

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-7768

(P2001-7768A)

(43) 公開日 平成13年1月12日 (2001.1.12)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テ-マ-ト <sup>*</sup> (参考)
H 0 4 B 10/17		H 0 4 B 9/00	J
10/16		G 0 2 F 1/35	5 0 1
G 0 2 F 1/35	5 0 1	H 0 1 S 3/06	B
H 0 1 S 3/06		3/30	Z
3/30		H 0 4 B 9/00	E

審査請求 未請求 請求項の数22 O L (全 30 頁) 最終頁に続く

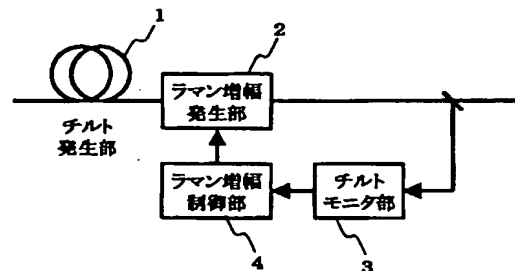
(21) 出願番号	特願平11-375092	(71) 出願人	000005223 富士通株式会社 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
(22) 出願日	平成11年12月28日 (1999. 12. 28)	(72) 発明者	尾中 美紀 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内
(31) 優先権主張番号	特願平11-115971	(72) 発明者	木下 進 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内
(32) 優先日	平成11年4月23日 (1999. 4. 23)	(74) 代理人	100078330 弁理士 笹島 富二雄
(33) 優先権主張国	日本 (J P)		

(54) 【発明の名称】 ラマン増幅による光伝送パワーの波長特性制御方法、並びに、それを用いた波長多重光通信システムおよび光増幅器

## (57) 【要約】

【課題】 各チャネル光に損失を与えることなく光伝送パワーの波長特性を自動的に補償して伝送特性の向上を図ったラマン増幅による光伝送パワーの波長特性制御方法およびそれを用いた装置を提供する。

【解決手段】 本発明のラマン増幅による光伝送パワーの波長特性制御方法は、WDM信号光が光伝送路を伝送されることで発生する光伝送パワーの波長特性に応じた波長帯のラマン励起光を光伝送路（ラマン増幅媒体）に供給し、発生するラマン増幅の利得波長特性によって前記光伝送パワーの波長特性を補償し、さらに、ラマン増幅後の光伝送パワーの波長特性をモニタして、ラマン増幅の利得波長特性を制御する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】光伝送路を伝送された波長多重信号光に生じる光伝送パワーの波長特性を制御する方法において、前記光伝送パワーの波長特性に応じて設定された波長帯のラマン励起光を、前記光伝送路の少なくとも一部を形成するラマン増幅媒体に供給し、該ラマン増幅媒体を伝搬する波長多重信号光に対して、前記光伝送パワーの波長特性を補償可能な利得の波長特性を有するラマン増幅を発生させるラマン増幅発生過程と、

前記ラマン増幅媒体を通過した波長多重信号光について光伝送パワーの波長特性をモニタする波長特性モニタ過程と、

該波長特性モニタ過程の結果に基づいて、前記ラマン励起光の発生状態を調整し、前記光伝送パワーの波長特性が平坦化されるようにラマン増幅の利得波長特性を制御するラマン増幅制御過程と、

を含んでなることを特徴とするラマン増幅による光伝送パワーの波長特性制御方法。

【請求項2】請求項1に記載の波長特性制御方法であって、

前記ラマン増幅発生過程は、複数の波長帯のラマン励起光を前記ラマン増幅媒体に供給し、

前記ラマン増幅制御過程は、前記各波長帯のラマン励起光の割合を調整して、ラマン増幅の利得波長特性を制御することを特徴とするラマン増幅による光伝送パワーの波長特性制御方法。

【請求項3】請求項2に記載の波長特性制御方法であって、

前記複数の波長帯のラマン励起光は、信号光帯域における利得波長特性の傾斜方向が互いに異なるようなラマン増幅を生じさせる波長帯のラマン励起光を含んでいることを特徴とするラマン増幅による光伝送パワーの波長特性制御方法。

【請求項4】請求項2に記載の波長特性制御方法であって、

前記ラマン増幅制御過程は、前記複数の波長帯のラマン励起光のうちの少なくとも1つの波長帯のラマン励起光の発生状態を一定とし、他の波長帯のラマン励起光の発生状態を調整することを特徴とするラマン増幅による光伝送パワーの波長特性制御方法。

【請求項5】請求項2に記載の波長特性制御方法であって、

前記ラマン増幅媒体の出力光パワーをモニタするパワーモニタ過程を含み、

前記ラマン増幅制御過程は、前記波長特性モニタ過程の結果および前記パワーモニタ過程の結果に基づいて、前記ラマン増幅媒体の出力光パワーが一定に保たれ、かつ、前記光伝送パワーの波長特性が平坦化されるように、前記各波長帯のラマン励起光の割合を調整することを特徴とするラマン増幅による光伝送パワーの波長特性

制御方法。

【請求項6】請求項1に記載の波長特性制御方法であって、

前記ラマン増幅発生過程は、分散シフトファイバを用いて形成された前記光伝送路をラマン増幅媒体として、前記ラマン励起光を供給することを特徴とするラマン増幅による光伝送パワーの波長特性制御方法。

【請求項7】請求項1に記載の波長特性制御方法であって、

前記ラマン増幅発生過程は、前記光伝送路に設けられた分散補償ファイバをラマン増幅媒体として、前記ラマン励起光を供給することを特徴とするラマン増幅による光伝送パワーの波長特性制御方法。

【請求項8】光送信装置と光受信装置の間が光伝送路で接続され、波長多重信号光が前記光伝送路を伝送されることで光伝送パワーの波長特性が生じる波長多重光通信システムにおいて、

前記光伝送パワーの波長特性に応じて設定された波長帯のラマン励起光を発生する励起光発生部と、前記光伝送路の少なくとも一部を形成するラマン増幅媒体と、前記ラマン励起光を前記ラマン増幅媒体に供給する励起光供給部とを有し、前記ラマン増幅媒体を伝搬する波長多重信号光に対して、前記光伝送パワーの波長特性を補償可能な利得の波長特性を有するラマン増幅を発生させるラマン増幅発生手段と、

前記ラマン増幅媒体を通過した波長多重信号光について光伝送パワーの波長特性をモニタする波長特性モニタ手段と、

該波長特性モニタ手段のモニタ結果に基づいて、前記励起光発生部におけるラマン励起光の発生状態を調整し、前記光伝送パワーの波長特性が平坦化されるようにラマン増幅の利得波長特性を制御するラマン増幅制御手段と、  
を備えて構成されたことを特徴とする波長多重光通信システム。

【請求項9】請求項8に記載の波長多重光通信システムであって、

前記ラマン増幅発生手段は、前記励起光発生部が複数の波長帯のラマン励起光を発生し、前記励起光供給部が前記複数の波長帯のラマン励起光を合波して前記ラマン増幅媒体に供給し、

前記ラマン増幅制御手段は、前記各波長帯のラマン励起光の割合を調整して、ラマン増幅の利得波長特性を制御することを特徴とする波長多重光通信システム。

【請求項10】請求項9に記載の波長多重光通信システムであって、

前記励起光発生部で発生する複数の波長帯のラマン励起光は、信号光帯域における利得波長特性の傾斜方向が互いに異なるようなラマン増幅を生じさせる波長帯のラマン励起光を含んでいることを特徴とする波長多重光通信

システム。

【請求項11】請求項9に記載の波長多重光通信システムであって、

前記ラマン増幅制御手段は、前記複数の波長帯のラマン励起光のうちの少なくとも1つの波長帯のラマン励起光の発生状態を一定とし、他の波長帯のラマン励起光の発生状態を調整することを特徴とする波長多重光通信システム。

【請求項12】請求項9に記載の波長多重光通信システムであって、

前記光伝送路を伝送される波長多重信号光の増幅を行う光増幅器を備え、該光増幅器は、入力光パワーおよび出力光パワーがそれぞれモニタされ利得一定制御で動作し、

前記ラマン増幅制御手段は、前記光増幅器での入力光パワーおよび出力光パワーのいずれかのモニタ結果および前記波長特性モニタ手段のモニタ結果に基づいて、前記光増幅器の入力光パワーまたは出力光パワーが一定に保たれ、かつ、前記光伝送パワーの波長特性が平坦化されるように、前記各波長帯のラマン励起光の割合を調整することを特徴とする波長多重光通信システム。

【請求項13】請求項8に記載の波長多重光通信システムであって、

前記光伝送路が、分散シフトファイバを用いて形成され、該分散シフトファイバを前記ラマン増幅媒体としたことを特徴とする波長多重光通信システム。

【請求項14】請求項8に記載の波長多重光通信システムであって、

前記光伝送路が、波長分散を補償するための分散補償ファイバを有し、該分散補償ファイバを前記ラマン増幅媒体としたことを特徴とする波長多重光通信システム。

【請求項15】波長多重信号光に対して光伝送パワーの波長特性を生じさせる光伝送路に接続され、該光伝送路を伝送される波長多重信号光の増幅を行う光増幅器において、

前記光伝送パワーの波長特性に応じて設定された波長帯のラマン励起光を発生する励起光発生部と、前記光伝送路に接続するラマン増幅媒体と、前記ラマン励起光を前記ラマン増幅媒体に供給する励起光供給部とを有し、前記ラマン増幅媒体を伝搬する波長多重信号光に対して、前記光伝送パワーの波長特性を補償可能な利得の波長特性を有するラマン増幅を発生させるラマン増幅発生手段と、前記ラマン増幅媒体を通過した波長多重信号光について光伝送パワーの波長特性をモニタする波長特性モニタ手段と、

該波長特性モニタ手段のモニタ結果に基づいて、前記励起光発生部におけるラマン励起光の発生状態を調整し、前記光伝送パワーの波長特性が平坦化されるようにラマン増幅の利得波長特性を制御するラマン増幅制御手段

と、

を備えて構成されたことを特徴とする光増幅器。

【請求項16】請求項15に記載の光増幅器であって、前記ラマン増幅発生手段は、前記励起光発生部が複数の波長帯のラマン励起光を発生し、前記励起光供給部が前記複数の波長帯のラマン励起光を合波して前記ラマン増幅媒体に供給し、

前記ラマン増幅制御手段は、前記各波長帯のラマン励起光の割合を調整して、ラマン増幅の利得波長特性を制御することを特徴とする光増幅器。

【請求項17】請求項16に記載の光増幅器であって、前記励起光発生部で発生する複数の波長帯のラマン励起光は、信号光帯域における利得波長特性の傾斜方向が互いに異なるようなラマン増幅を生じさせる波長帯のラマン励起光を含んでいることを特徴とする光増幅器。

【請求項18】請求項16に記載の光増幅器であって、前記ラマン増幅制御手段は、前記複数の波長帯のラマン励起光のうちの少なくとも1つの波長帯のラマン励起光の発生状態を一定とし、他の波長帯のラマン励起光の発生状態を調整することを特徴とする光増幅器。

【請求項19】請求項15に記載の光増幅器であって、前記光伝送路が、波長分散を補償するための分散補償ファイバを有し、該分散補償ファイバを前記ラマン増幅媒体としたことを特徴とする光増幅器。

【請求項20】請求項15に記載の光増幅器であって、希土類元素ドープファイバに対して当該希土類元素を励起可能な励起光を供給して波長多重信号光の増幅を行う光ファイバ増幅手段を備え、前記希土類元素ドープファイバを前記ラマン増幅媒体としたことを特徴とする光増幅器。

【請求項21】請求項20に記載の光増幅器であって、前記光ファイバ増幅手段は、前記希土類元素を励起可能な励起光と前記ラマン励起光とを合波した光が、波長多重信号光の伝送方向とは逆方向から前記希土類元素ドープファイバに供給されると共に、

前記希土類元素ドープファイバを通過した、ラマン励起光を前記光伝送路に向けて伝達し、前記波長多重信号光の反射戻り光を遮断する励起光伝達手段を備えて構成され、前記希土類元素ドープファイバおよび前記光伝送路をラマン増幅媒体としたことを特徴とする光増幅器。

【請求項22】請求項21に記載の光増幅器であって、前記励起光伝達手段は、前記光伝送路と前記希土類元素ドープファイバの間に挿入された光サーキュレータを含むことを特徴とする光増幅器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光伝送路を伝送される波長多重信号光に生じる光伝送パワーの波長特性を制御する技術に関し、特に、ラマン増幅を利用して前記光伝送パワーの波長特性を補償する制御方法、並びに、

その制御方法が適用される波長多重光通信システムおよび光増幅器に関する。

【0002】

【従来の技術】例えば、エルビウムドープファイバ増幅器の広い利得帯域を活用した波長多重(WDM)光伝送方式は、複数の波長の光信号を1本の光ファイバで伝送することにより、通信容量を増大させるとが可能な伝送方式である。このWDM光伝送方式は、既存の光ファイバを利用できるため導入コストが低く、また、光増幅器等を用いることで伝送路はビットレートフリーとなり、将来のアップグレードが容易であるなどの利点を有する。

【0003】WDM光通信システムにおいて、所要の伝送特性を得るためには、各チャネル間の光パワーのバラツキを各光中継段において1.0dB以下に抑える必要がある。この理由は、光パワーの上限が伝送路の非線形効果により制限され、下限が光増幅器の自然放光による受信S/Nにより制限されるからである。そこで、WDM光通信システムを構成する伝送路や分散補償ファイバ等の損失波長特性を小さくする必要があり、特にシステムのキーコンポーネントのひとつである多波長の光信号を一括して増幅する光増幅器には、低雑音特性と所定の出力値を送出することに加えて、チャネル間の出力バラツキが小さいことが強く望まれている。

【0004】実際のWDM光通信システムでは、次に挙げる事柄などにより各チャネル間の光伝送パワーに波長特性が生じる。

- ①レイリー散乱による伝送路の損失波長特性
  - ②分散補償器の損失波長特性
  - ③誘導ラマン散乱による伝送路の損失波長特性
  - ④光増幅器の利得の波長特性
  - ⑤伝送路、分散補償器および光増幅器の温度特性
- 具体的には、例えば、信号光の波長帯域を1530～1560nmとした場合に、長さ80kmの1.3μm零分散シングルモードファイバ(SMF)を伝送路に用いたとき、上記①および③に起因して発生する光伝送パワーの偏差はそれぞれ約0.5dBおよび約1dBとなる。また、上記②に起因する偏差は、一般的な分散補償ファイバ(DCF)を分散補償器として用いたとき約0.5dBとなり、上記④に起因する偏差は、一般的なエルビウムドープ光ファイバ増幅器(EDFA)を用いたとき約1dBとなる。さらに、上記⑤に起因する偏差は、前記各光デバイスを用いたとき約0.3dBと見積もることができる。

【0005】これらにより生じた波長特性は、伝送条件(チャネル数、チャネル間隔、入力パワー、伝送路の長さ等)により、その大きさが異なる。そこで、WDM光通信システムには、変化して生じる波長特性に対応して、これを補償できる手段を新たに適用する必要がある。このような各チャネル間の光伝送パワーの波長特性

を、例えば、WDM光通信システムに設置した各光増幅中継段において補償するようにした場合には、1つの光増幅中継段で補償すべき波長特性の幅はおよそ3dBとなる。

【0006】従来、上記のような光伝送パワーの波長特性を補償するための方策として、例えば、損失波長特性を変化させることのできる可変利得等化器等を光通信システムに新たに適用する方法が提案されている。かかる方法では、システムで発生する光伝送パワーの波長特性に応じて、可変利得等化器の損失波長特性が制御されることによって、各チャネル間の光伝送パワーが均一にされる。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記のような従来の光伝送パワーの波長特性制御方法では、最もパワーの小さいチャネルにあわせて、他のチャネルに対して損失を与えることで光伝送パワーを均一にするため、可変利得等化器等の挿入前と比べて光SN比の劣化を招き、伝送特性を悪化させる可能性がある。

【0008】損失を小さく抑えて光伝送パワーの波長特性を補償する方法の1つとして、ラマン増幅を利用することが有効である。この方法は、パワーの小さいチャネルをより優先的に増幅することで光伝送パワーの波長特性を補償する。

【0009】ラマン増幅を利用した技術としては、例えば、文献:S.Kinoshta et al.,OEC,10B2-3,July,1997、文献:江森他、「波長多重励起LDユニットを用いたDCFラマンアンプとその応用」,信学技報OCS98-58,p.7-12,1998などが知られている。これらの文献に示された技術は、1480nm帯等の励起光源を使用して光増幅器内の分散補償ファイバをラマン増幅することにより、分散補償ファイバの低損失化および光増幅器の広帯域化を図ったものである。また、特開平10-73852号公報には、ラマン増幅を利用して信号伝送帯域の広帯域化を図った光増幅伝送システムが記載されている。

【0010】しかし、これらのラマン増幅を利用した公知技術は、波長帯やパワー等が予め設定された固定の励起光を分散補償ファイバ等に供給してラマン増幅を発生させるものであるため、伝送路等で生じる光伝送パワーの波長特性に変動が生じた場合に、その変動に応じてラマン増幅の利得波長特性を柔軟に変化させることは難しい。WDM光通信システムでは、伝送されるWDM信号光のチャネル数や使用波長が様々に変化し、光伝送パワーの波長特性も変動することが考えられるため、その変動にも対応した柔軟な波長特性の補償が望まれる。

【0011】本発明は上記の点に着目してなされたもので、各チャネル光に損失を与えることなく光伝送パワーの波長特性を自動的に補償し、また、ラマン増幅により伝送路の損失を補償することで伝送特性の向上を図った、ラマン増幅による光伝送パワーの波長特性制御方

法、並びに、それを用いた波長多重光通信システムおよび光増幅器を提供することを目的とする。

【0012】

【課題を解決するための手段】上記の目的を達成するため、本発明のラマン増幅による光伝送パワーの波長特性制御方法は、光伝送路を伝送されたWDM信号光に生じる光伝送パワーの波長特性を制御する方法において、前記光伝送パワーの波長特性に応じて設定された波長帯のラマン励起光を、前記光伝送路の少なくとも一部を形成するラマン増幅媒体に供給し、該ラマン増幅媒体を伝搬するWDM信号光に対して、前記光伝送パワーの波長特性を補償可能な利得の波長特性を有するラマン増幅を発生させるラマン増幅発生過程と、前記ラマン増幅媒体を通過したWDM信号光について光伝送パワーの波長特性をモニタする波長特性モニタ過程と、該波長特性モニタ過程の結果に基づいて、前記ラマン励起光の発生状態を調整し、前記光伝送パワーの波長特性が平坦化されるようにラマン増幅の利得波長特性を制御するラマン増幅制御過程と、を含んでなるものである。

【0013】かかる波長特性制御方法では、光伝送路を伝送されることで光伝送パワーの波長特性（チルト）が生じたWDM信号光が、ラマン増幅発生過程においてラマン励起光の供給されたラマン増幅媒体を通過することでラマン増幅される。このラマン増幅は、上記光伝送パワーの波長特性を補償可能な利得の波長特性を有するようにラマン励起光の波長帯が設定されているため、ラマン増幅後のWDM信号光における光伝送パワーのバラツキが平坦化される。このWDM信号光については、波長特性モニタ過程において光伝送パワーの波長特性がモニタされ、ラマン増幅発生過程での波長特性の補償が有効に行われているかが監視される。そして、ラマン増幅制御過程では、波長特性モニタ過程のモニタ結果がフィードバックされて、光伝送パワーの波長特性が平坦化されるように、ラマン励起光の発生状態が調整され（例えば、ラマン励起光のパワーの調整や、励起光源の制御温度の調整など）、ラマン増幅の利得波長特性が制御される。

【0014】これにより、光伝送パワーにバラツキが生じたWDM信号光に対し、ラマン増幅の利得波長特性を利用することで、本チルト補償の適用により、基本的に、伝送路に新たに挿入する光部品はラマン増幅の励起光合波器のみであり、殆ど損失を与えることなく光伝送パワーの波長特性を補償できる。これとともに、ラマン増幅後の光伝送パワーの波長特性をモニタしてラマン増幅の利得波長特性が制御されるため、伝送されるWDM信号光のチャンネル数や使用波長が様々な変化し光伝送パワーの波長特性が変動しても、その変動に応じた柔軟な波長特性の補償を実現できるようになる。

【0015】また、上記の波長特性制御方法について、ラマン増幅発生過程は、複数の波長帯のラマン励起光を

ラマン増幅媒体に供給し、ラマン増幅制御過程は、各波長帯のラマン励起光の割合を調整して、ラマン増幅の利得波長特性を制御するようにしてもよい。さらに、複数の波長帯のラマン励起光は、信号光帯域における利得波長特性の傾斜方向が互いに異なるようなラマン増幅を生じさせる波長帯のラマン励起光を含むようにするのが好ましい。ラマン励起光の具体的な調整方法としては、複数の波長帯のラマン励起光のうちの少なくとも1つの波長帯のラマン励起光の発生状態を一定とし、他の波長帯のラマン励起光の発生状態を調整してもよい。

【0016】このようにすることで、ラマン増幅の利得波長特性が、各波長帯の励起光の割合に応じて変化ようになるため、ラマン増幅の利得波長特性をより精度良く制御することができる。

【0017】さらに、上記の波長特性制御方法については、ラマン増幅媒体の出力光パワーをモニタするパワーモニタ過程を含み、ラマン増幅制御過程は、波長特性モニタ過程の結果およびパワーモニタ過程の結果に基づいて、ラマン増幅媒体の出力光パワーが一定に保たれ、かつ、光伝送パワーの波長特性が平坦化されるように、各波長帯のラマン励起光の割合を調整するようにしてもよい。

【0018】このようにすることで、光パワーが一定で波長特性が平坦なラマン増幅された波長多重信号光が得られるようになる。また、上記の波長特性制御方法の具体的なラマン増幅発生過程としては、分散シフトファイバを用いて形成された光伝送路をラマン増幅媒体として、ラマン励起光を供給してもよく、あるいは、光伝送路に設けられた分散補償ファイバをラマン増幅媒体として、ラマン励起光を供給しても構わない。

【0019】このように、モードフィールド径の比較的小さい分散シフトファイバや分散補償ファイバをラマン増幅媒体として用いることで、より小さなパワーのラマン励起光により所要のラマン増幅を発生させることができる。

【0020】上述したラマン増幅による光伝送パワーの波長特性制御方法は、後述するようなWDM光通信システムや光増幅器などの各種装置に適用して、WDM信号光の伝送特性の向上を図ることが可能である。

【0021】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施形態を図面に基づいて説明する。図1は、本発明に係るラマン増幅による光伝送パワーの波長特性の制御方法を適用した装置の基本構成を示すブロック図である。

【0022】図1において、本装置の基本構成は、チルト発生部1と、該チルト発生部1に接続されるラマン増幅発生部2と、該ラマン増幅発生部2の出力光の一部を入力とするチルトモニタ部3と、チルトモニタ部3のモニタ結果を受けてラマン増幅発生部2の動作を制御するラマン増幅制御部4と、を有する。

【0023】チルト発生部1は、伝送されるWDM信号光に対して各チャネル間の光伝送パワーに波長特性（チルト）を生じさせる部分であり、具体的には、光ファイバ伝送路、分散補償器または光増幅器などの光伝送路を構成する各種光デバイスに相当する。

【0024】ラマン増幅発生部2は、チルト発生部1からのWDM信号光をラマン増幅することにより、チルト発生部1で生じたチルトを補償して、各チャネル間の光伝送パワーを均一にする。ラマン増幅は、ラマン増幅媒体に所要の励起光を供給することによって、該ラマン増幅媒体内を伝搬する光信号が増幅される現象である。ラマン増幅の特徴およびラマン増幅発生部2の具体的な構成については後述する。

【0025】チルトモニタ部3は、ラマン増幅発生部2から出力されるWDM信号光の一部を用いて光伝送パワーの波長特性をモニタし、そのモニタ結果をラマン増幅制御部4に出力する。このチルトモニタ部3の具体的な構成についても後述する。

【0026】ラマン増幅制御部4は、チルトモニタ部3のモニタ結果に応じて、ラマン増幅発生部2におけるラマン励起光のパワー等を調整することにより、光伝送パワーの波長特性が平坦化されるようにラマン増幅の利得波長特性を制御する。

【0027】ここで、ラマン増幅の特徴について説明する。ラマン増幅は、基本的な特性として、励起波長に応じて異なる利得波長特性を有し、かつ、利得ピークを外した波長域での単位波長当たりの利得特性が比較的良好な線形性を有することが知られている。なお、ラマン増幅の利得が最大になる波長は、ラマン励起光の波長より13.2THz小さい周波数に位置する。

【0028】図2は、ラマン励起波長に対するラマン利得ピーク波長を示す図であり、図3は、ラマン励起波長に対する信号光帯域の利得傾斜量を示す図である。ここでは、信号光帯域を例えば1530～1560nm（以下、Cバンド帯と略す）とし、図中の各点は公知の文献に示されたデータをプロットしたものである。なお、利得傾斜量の符号は、信号光の波長が長くなると利得が増加する（波長に対して右上がり）場合を「+」とし、利得が減少する（波長に対して右下がり）場合を「-」としている。

【0029】各図に示すように、ラマン増幅については、励起波長に対する利得ピーク波長が一次近似曲線で表すことができるものと考えられる。また、上記の信号光帯域におけるラマン増幅の利得傾斜量は、励起波長がおおよそ1450nmよりも短い場合に「-」となり、長い場合に「+」となって、励起波長が1450nmから離れるほど、その絶対値が大きくなるものと考えられる。

【0030】信号光帯域をCバンド帯とするWDM光通信システムについて、チルト発生部1で生じる光伝送パ

ワーの波長特性を補償するために要求される補償波長特性は、波長に対して線形性を有し、その傾斜量の絶対値が0.1dB/nm以上であることが必要となる。補償波長特性の傾斜量の絶対値を0.1dB/nm以上とする理由は、上述したように①～⑤に起因して発生するチルトが±3dB程度であり、信号光の帯域幅が30nmであるので、波長特性の傾斜量としては、±3dB/30nm=±0.1dB/nmと見積もることができるためである。

【0031】そこで、上記のような補償波長特性がラマン増幅により実現されるための条件を検討してみる。補償波長特性が線形性を有するためには、ラマン増幅の利得ピーク波長が信号光帯域外となる必要がある。前述の図2において、利得ピーク波長がCバンド帯から外れる条件は、励起波長が1435nmより短波長側および1462nmより長波長側となる。また、補償波長特性の利得傾斜量の絶対値が0.1dB/nm以上となるためには、前述の図3において、励起波長が1447nmより短波長側および1480nmより長波長側となる。したがって、補償波長特性を実現するラマン増幅の条件は、励起波長が1435nmより短波長側（チルト補償に「-」の利得傾斜を要する場合）および1480nmより長波長側（チルト補償に「+」の利得傾斜を要する場合）と判断できる。

【0032】次に、ラマン増幅発生部2の具体的な構成例について説明する。図4は、1種類の波長の励起光を用いた場合におけるラマン増幅発生部2の具体的な構成の一例を示す図である。

【0033】図4の構成では、励起LD23によって生成された波長λのラマン励起光が、チルト発生部1に接続されたラマン増幅媒体21の後方側からWDMカブラ22を介して供給される。励起LD23の駆動状態は、チルトモニタ部3のモニタ結果に応じてラマン増幅制御部4から出力される信号により制御される。ラマン励起光の波長λは、上記の検討結果に従い、かつ、チルト発生部1で生じる光伝送パワーの波長特性に対応させて予め設定されるものである。なお、ここでは、励起光がラマン増幅媒体21の後方側から供給される場合を示したが、ラマン増幅媒体21の前方側から励起光が供給される構成も可能である。

【0034】図5は、励起波長λを例えば1430nmとしたときのラマン増幅の利得波長特性を示す図であって、ラマン増幅媒体21が、(a) SMFの場合、(b) 分散シフトファイバ(NZ-DSF)の場合をそれぞれ示している。

【0035】図5に示すように、励起波長λを1430nmとしたときのラマン増幅の波長特性は、それぞれのラマン増幅媒体21において、波長が長くなると利得が小さくなり、励起光パワーの増大に伴って利得が大きくなることからわかる。また、ラマン増幅媒体21のモード

フィールド径（ここでの大小関係はSMF>NZ-DSF）が小さくなるほど、ラマン増幅の励起効率が高くなることもわかる。

【0036】また、図6は、ラマン励起光パワーが81 mWおよび16 mWのそれぞれについて、WDM信号光の入力パワーを3段階に変化させたときのラマン増幅の利得波長特性の一例を示す図である。

【0037】図6に示すように、ラマン増幅の利得波長特性は、ラマン増幅媒体21に入力されるWDM信号光のパワーには依存せず、ラマン増幅は非飽和状態で動作する入力域が広いことがわかる。

【0038】さらに、図7は、励起波長 $\lambda$ を例えば1485 nmとしたときのラマン増幅の利得波長特性を示す図であって、ラマン増幅媒体21が、(a) SMFの場合、(b) 分散シフトファイバ(NZ-DSF)の場合をそれぞれ示している。

【0039】図7に示すように、励起波長 $\lambda$ を1485 nmとしたときのラマン増幅の波長特性は、それぞれのラマン増幅媒体21において、波長が長くなると利得が大きくなり、励起光パワーの増大に伴って利得が大きくなる特性を示すことがわかる。また、ラマン増幅媒体21のモードフィールド径が小さくなるほど、ラマン増幅の励起効率が高くなることもわかる。

【0040】したがって、チルト発生部1で生じるチルトの傾きに応じて励起LD23の波長 $\lambda$ を適宜に選択し、また、チルトの発生量に応じて、励起LD23の出力パワーを制御したり、各種ラマン増幅媒体21の長さを設定したりすることで、光伝送パワーの波長特性の補償を適切に行うことが可能となる。

【0041】上述したラマン増幅による補償波長特性の検討およびラマン増幅発生部2の具体的な構成は、1つの波長の励起光によりラマン増幅媒体にラマン増幅を発生させた場合のものであるが、ラマン増幅は複数の波長の励起光によっても発生可能である。複数の波長の励起光によりラマン増幅を発生させる場合には、信号光に対するラマン増幅の利得波長特性が、使用する励起波長および各波長の励起光の割合に応じて変化する。このため、ラマン増幅媒体への各励起光の供給状態を調整することで、ラマン増幅の利得波長特性をより高度に制御することができる。

【0042】図8は、2種類の励起波長 $\lambda_1, \lambda_2$ を用いた場合におけるラマン増幅発生部2の具体的な構成の一例を示す図である。図8の構成では、励起LD23<sub>1</sub>によって生成された波長 $\lambda_1$ のラマン励起光および励起LD23<sub>2</sub>によって生成された波長 $\lambda_2$ のラマン励起光が、WDMカブラ22aで合波され、さらにWDMカブラ22bを介してラマン増幅媒体21の後方側から供給される。各励起LD23<sub>1, 2</sub>の駆動状態は、チルトモニタ部3のモニタ結果に応じてラマン増幅制御部4から出力される信号によりそれぞれ制御される。

【0043】なお、ここでは各波長の励起光がラマン増幅媒体21の後方側から供給される場合を示したが、図9に示すようにラマン増幅媒体21の前方側から各励起光が供給される構成も可能である。また、図10に示すように、各々の励起光がWDMカブラ22<sub>1, 2</sub>を介してラマン増幅媒体21の双方向から供給される構成としてもよい。

【0044】また、各波長の励起光がそれぞれ1つの励起LDから出力される構成を示したが、1つの励起LDの出力光パワーが不足するような場合には、複数の励起LDを用いて各波長の励起光を発生させてもよい。図11～図13は、2つの励起LDをそれぞれ用いて波長 $\lambda_1, \lambda_2$ の各励起光を発生させるようにした構成例を示す図である。

【0045】図11の後方励起型および図12の前方励起型の各構成では、励起LD23<sub>1a, 231b</sub>によって生成された波長 $\lambda_1$ の各ラマン励起光が偏波面保存ファイバを介して直交偏波合波器(PBS)25<sub>1</sub>で合波されるとともに、励起LD23<sub>2a, 232b</sub>によって生成された波長 $\lambda_2$ の各ラマン励起光が偏波面保存ファイバを介して直交偏波合波器(PBS)25<sub>2</sub>で合波される。そして、各波長 $\lambda_1, \lambda_2$ の励起光がWDMカブラ22aで合波された後に、WDMカブラ22aを介してラマン増幅媒体21に供給される。また、図13の双方向励起型の構成では、直交偏波合波器25<sub>1, 2</sub>で合波された各波長 $\lambda_1, \lambda_2$ の励起光がそれぞれWDMカブラ22<sub>1, 2</sub>を介してラマン増幅媒体21に供給される。

【0046】さらに、図14に示すように、図11の後方励起型と図12の前方励起型とを組み合わせる双方向励起型とした構成も可能である。また、上記の構成例では、各励起LDから出力される励起光をWDMカブラや直交偏波合波器を用いて合波するようにしたが、この他にも、複数の励起LDに対応した入力ポートを有するWDM合波器を用いることもできる。図15～図17は、WDM合波器を用いた場合の構成例を示す図である。

【0047】図15の後方励起型、図16の前方励起型および図17の双方向励起型の各構成では、励起LD23<sub>a, 23b</sub>によって生成された各波長 $\lambda_1, \lambda_2$ の励起光がWDM合波器(WDM MUX)26によって合波され、WDMカブラ22を介してラマン増幅媒体21に供給される。

【0048】ここで、2つの波長の励起光を用いたときのラマン増幅について簡単に説明する。図18は、例えば、励起波長 $\lambda_1$ を1430 nmとし、励起波長 $\lambda_2$ を1485 nmとしたときに得られるラマン増幅の利得波長特性の一例を示す。

【0049】図18に示すように、利得波長特性の傾きの符号(傾斜方向)が互いに異なるような2つの波長 $\lambda_1, \lambda_2$ の各励起光を所要の割合(図では20.8 mW: 57 mW)でラマン増幅媒体21に供給することによ



て、1つの波長 $\lambda_1$ の励起光のみを所要のパワー（図では170mW）で供給したときに得られるラマン増幅の利得波長特性に対し、これと同様の傾きを持ち信号光帯域全体の利得を増大させた利得波長特性が実現される。このように、発生するチルトに対応した傾きを保った状態で信号光帯域全体の利得を大きくすれば、光SN比の向上を図ることが可能になる。

【0050】次に、チルトモニタ部3の具体的な構成について説明する。チルトモニタ部3では、前述したようにラマン増幅発生部2の出力光について光伝送パワーの波長特性がモニタされる。この光伝送パワーの波長特性のモニタは、一般に出力光の光スペクトルを測定して行われ、その具体的な測定方法については様々な技術が提案されている（例えば、本出願人による先願の特願平11-54374号、文献；K.Otsuka et al., ECOC'97, Vol. 2, pp147-150(1997)等を参照）。ここでは、上記の方法の一例を挙げ、その概要について説明する。

【0051】図19は、チルトモニタ部3の構成の一例を示すブロック図である。図19のチルトモニタ部3は、光カプラ3Aで分岐されたラマン増幅発生部2からのWDM信号光の一部をさらに2分岐する光カプラ3Bと、透過帯域の異なる光フィルタ3C、3Dと、各光フィルタ3C、3Dを通過した光を電気信号に変換する受光器(PD)3E、3Fと、各受光器3E、3Fからの信号を基に光伝送パワーの波長特性を求める光スペクトルモニタ3Gと、を有する。なお、ここではチルトモニタ部3に送られる光信号が、その伝送の過程で光ファイバ増幅器等によって増幅されているものとする。

【0052】光フィルタ3Cは、光カプラ3Bで2分岐された一方の光信号から、最大入力信号数における最短の信号光波長に近傍する狭波長帯の自然放出(ASE)光を抽出するものである。また、光フィルタ3Dは、光カプラ3Bで2分岐された他方の光信号から、最大入力信号数における最長の信号光波長に近傍する狭波長帯のASE光を抽出するものである。

【0053】図20は、各光フィルタ3C、3Dで抽出されるASE光の概要を示した図である。図20に示すように、ここでは、光フィルタ3Cの透過帯域の中心波長 $\lambda_S$ を最短信号波長 $\lambda_{MIN}$ の短波長側近傍に設定し、光フィルタ3Dの透過帯域の中心波長 $\lambda_L$ を最短信号波長 $\lambda_{MAX}$ の短波長側近傍に設定する。中心波長 $\lambda_S$ 、 $\lambda_L$ から信号波長 $\lambda_{MIN}$ 、 $\lambda_{MAX}$ までの波長幅は、各光フィルタ3C、3Dの透過帯域幅に応じて決まり、光フィルタの透過帯域内に信号光が含まれない範囲で可能な限り狭くする。この急峻な透過特性を有する光フィルタとしては、例えばファイバブラッググレーティング等が好適であり、その透過帯域幅は0.1nm程度のものが実現されている。このような光フィルタを使用する場合には、中心波長 $\lambda_S$ 、 $\lambda_L$ から信号波長 $\lambda_{MIN}$ 、 $\lambda_{MAX}$ までの幅は1nm程度に設定すればよい。

【0054】光スペクトルモニタ3Gは、光フィルタ3Cで抽出され受光器3Eで光電変換された信号を基に最短波長近傍のASE光パワーを求めるとともに、光フィルタ3Dで抽出され受光器3Fで光電変換された信号を基に最長波長近傍のASE光パワーを求め、各ASE光パワーの偏差に応じて、ラマン増幅発生部2の出力光におけるチャンネル間出力偏差を算出し、その値をラマン増幅発生部2にフィードバックする。ただし、ASE光パワーの偏差を信号光の出力偏差とすることができるとは、信号光とASE光の比が波長に対して一定であることを前提としている。このようにASE光パワーをモニタすることで、伝送される信号光の数や信号光波長の変動に関係なく、チャンネル間の光伝送パワーのバラツキをモニタすることができる。

【0055】なお、光伝送パワーの波長特性をモニタする方法は、上記のASE光を利用する方法に限られるものではない。例えば、WDM信号光に含まれる最短波長および最長波長の信号光パワーを測定して、光伝送パワーの波長特性をモニタしてもよい。この場合には、チルトモニタ部3が入力信号光の最短波長および最長波長に関する情報を外部から得る必要があり、また、最短波長および最長波長の信号光を抽出する光フィルタとして、透過帯域を変化させることのできるチューナブルフィルタを適用する必要がある。

【0056】上述したような基本構成(図1)の装置では、Cバンド帯等のWDM信号光がチルト発生部1を伝搬することで、例えば図21に示すように、各チャンネルの光伝送パワーが波長の増長とともに大きくなる右上がりのチルトが発生し、このようなチルトを有するWDM信号光が、ラマン増幅発生部2に送られる。

【0057】ラマン増幅発生部2では、前記右上がりのチルトに応じて設定された所要の励起光がラマン増幅媒体21に供給されており、チルト発生部1からのWDM信号光がラマン増幅媒体21に入力される。ラマン増幅媒体21内を伝搬するWDM信号光は、図22に示すようなラマン増幅の利得波長特性に従って増幅される。これによりチルト発生部1で生じた光伝送パワーの波長特性が、ラマン増幅発生部2におけるラマン増幅によって補償され、図23に示すような各チャンネル間の光伝送パワーのバラツキが平坦化されたWDM信号光が、ラマン増幅発生部2から出力される。

【0058】このラマン増幅発生部2の出力光の一部は、チルトモニタ部3に送られて、光伝送パワーの波長特性がモニタされ、ラマン増幅発生部2における補償動作が有効に機能しているかのモニタが行われる。

【0059】チルトモニタ部3のモニタ結果を受けたラマン増幅発生部2では、ラマン増幅されたWDM信号光のチャンネル間出力偏差が補正されるように励起LDの駆動状態を制御する信号が、ラマン増幅制御部4で生成され励起LDに伝達される。

【0060】具体的には、図4に示したように単一の波長の励起光をラマン増幅媒体21に供給する場合には、励起LD23の出力パワーが制御され、また、図8～17に示したように複数の波長の励起光をラマン増幅媒体21に供給する場合には、各励起LDの駆動状態がそれぞれ調整されて、各々の波長の励起光の供給パワーおよびその割合が制御される。

【0061】例えば、2つの波長 $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  ( $\lambda_1 < \lambda_2$ )の励起光を用いてCバンド帯の信号光をラマン増幅させる場合、望ましい制御方法としては、長波長側の波長 $\lambda_2$ の励起光パワーを一定とし、ラマン増幅制御部4から

の制御信号に応じて、短波長側の波長 $\lambda_1$ の励起光パワーを調整するようにする。

【0062】図24は、例えば、波長 $\lambda_2 = 1.47 \mu\text{m}$ の励起光パワーを一定とし、波長 $\lambda_1 = 1.43 \mu\text{m}$ の励起光パワーを変化させたときのラマン利得の波長特性を示した図であって、(a)は、最小ラマン利得が4 dBとなるように1.47  $\mu\text{m}$ の励起光パワーを83 mWで一定とした場合の測定結果であり、(b)は、最小ラマン利得が6 dBとなるように1.47  $\mu\text{m}$ の励起光

パワーを133 mWで一定とした場合の測定結果である。

【0063】図24に示すように、1.43  $\mu\text{m}$ の励起光パワーを大きくするとともに、ラマン利得の波長特性の右下がりの傾斜が大きくなることが分かる。従って、チルトモニタ部3でモニタされたチャンネル間出力偏差に応じて、1.47  $\mu\text{m}$ の励起光パワーを調整する制御信号をラマン増幅制御部4が生成すれば、実際のラマン増幅状態に応じた適切な補償動作が自動的に行われるようになる。

【0064】上述したような基本構成を有する装置によれば、各チャンネルの光伝送パワーにバラツキが生じたWDM信号光に対して、従来のように「損失」を与えるのではなく、ラマン増幅の利得波長特性を利用してパワーの低いチャンネルを優先的に増幅することで光伝送パワーの波長特性の補償が行われるため、光SN比の劣化を防止でき、さらには、ラマン増幅発生部2の挿入損失以上にラマン増幅により補償すれば、光SN比の改善を図ることもできる。また、チルトモニタ部3を設けて、ラマン増幅発生部2におけるラマン増幅の利得波長特性を制御するようにしたことで、光伝送パワーの波長特性をより確実に補償することができる。このようにラマン増幅の利得波長特性を自動的に制御できるようにすることは、使用するチャンネル光の数や波長が多様に変化するシステムについて特に有効である。

【0065】次に、上述したような基本構成が適用される具体的な実施形態について説明する。図25は、上述の基本構成を適用した第1の実施形態のWDM光通信システムの全体構成を示すブロック図である。

【0066】図25のシステムは、例えば、光送信装置

(OS)5と光受信装置(OR)6との間を光伝送路7で接続し、その光伝送路7の途中に光増幅器8を配置して、WDM信号光の中継伝送を行う一般的なWDM光通信システムについて、各中継区間の光伝送路7をラマン増幅媒体とし、上述の基本構成を適用したものである。

【0067】具体的には、各中継区間の光伝送路7の出力端と光増幅器8の入力端との間にそれぞれWDMカブラ22bが設けられ、励起LD23<sub>1</sub>から出力される波長1430 nmの励起光および励起LD23<sub>2</sub>から出力される波長1485 nmの励起光をWDMカブラ22aで合波した励起光が、WDMカブラ22bを介して光伝送路7の後方側から供給される。また、各光増幅器8の出力端には光カブラ3Aが配置され、該光カブラ3Aの分岐光を用いて光伝送パワーの波長特性をモニタするチルトモニタ部3が設けられる。このチルトモニタ部3のモニタ結果はラマン増幅制御部4に送られて、該ラマン増幅制御部4から各中継区間に対応した各々の励起LDに制御信号がそれぞれ伝達される。

【0068】光伝送路7としては、例えば、1.3  $\mu\text{m}$ 零分散SMFや分散シフトファイバ(DSF,NZ-DSF)などが用いられ、1つの中継区間の長さが、例えば40～100 km程度とされる。また、光増幅器8としては、例えばエルビウムドープ光ファイバ増幅器(EDFA)等の公知の光増幅器とすることができる。

【0069】このように第1の実施形態では、上述の図8に示した構成のラマン増幅発生部2が各中継区間に対応させてそれぞれ適用されたものであり、各中継区間の光伝送路7がチルト発生部1およびラマン増幅発生部2のラマン増幅媒体21に相当する。また、励起LD23<sub>1</sub>, 23<sub>2</sub>が励起光発生部に相当し、WDMカブラ22a, 22bが励起光供給部に相当する。なお、2段目の中継区間以降では、光増幅器8もチルト発生部1の一部となる。

【0070】かかる構成の第1実施形態では、各チャンネル光パワーの揃ったWDM信号光が光送信装置5から初段の中継区間の光伝送路7に送出される。この光伝送路7には、波長1430 nmの励起光および波長1485 nmの励起光が所要のパワーおよび割合で供給されているため、光伝送路7に固有の損失波長特性がラマン増幅による利得波長特性によって補償される。このため、光伝送路7を通過したWDM信号光は、各チャンネルの光伝送パワーがほぼ揃ったものとなる。

【0071】初段の中継区間の光伝送路7およびWDMカブラ22bを通過したWDM信号光は、光増幅器8で所要のレベルまで増幅された後に次段の光伝送路7に送られ、以降、初段の中継区間の場合と同様の動作が繰り返される。

【0072】また、各光増幅器8から出力されたWDM信号光は、その一部が光カブラ3Aで分岐されチルトモニタ部3に送られる。チルトモニタ部3では、中継伝送

されたWDM信号光についての光伝送パワーの波長特性がモニタされて、そのモニタ結果がラマン増幅制御部4にフィードバックされる。

【0073】ラマン増幅制御部4では、例えば、Cバンド帯のWDM信号について短波長側の光伝送パワーが長波長側に比べて小さいというモニタ結果を受けると、送信側の中継区間の各励起LDから順に、波長1430nmの励起光パワーの割合が大きくなるようにそれぞれの駆動状態が制御される。逆に、短波長側の光伝送パワーが長波長側に比べて大きいというモニタ結果を受けると、波長1430nmの励起光パワーの割合が小さくなるように各励起LDの駆動状態が送信側から順次制御される。

【0074】つまり、ラマン増幅制御部4では、光通信システム全体の伝送特性を考慮し、送信側でのモニタ結果を優先して、送信側から受信側へ順番にチルトを補償して行く。この時、複数のラマン増幅部で同時にチルト補償は行わず、チルト補償を行っていないラマン増幅部では、励起光の発生状態について現状を維持することを基本とする。

【0075】このようにして、各チャネルの光伝送パワーの波長特性がラマン増幅により補償されたWDM信号光は、光受信装置6に送られて各波長の信号光ごとに分波され、受信処理が実行される。

【0076】ここで、上記のようなWDM光通信システムについて行った伝送実験の結果を示す。ただし、ここでの伝送実験は、1つの中継区間についての伝送特性、すなわち、初段の中継区間の光伝送路7および光増幅器8を通過したWDM信号光の伝送特性を測定するものとした。また、WDM信号光としては、Cバンド帯に8波の光信号を配置したものを使用した。

【0077】図26は、光増幅器8から出力されるWDM信号光パワーの波長特性を示す図である。ここでは、伝送路7にラマン励起光を供給しない場合、波長1430nmの励起光のみを供給する場合、波長1430nmおよび1485nmの各励起光を所要の割合で供給する場合について、光伝送パワーの波長特性がそれぞれ示してある。

【0078】図26に示すように、ラマン励起光を供給しない場合には、信号光の波長が長くなるのに伴って光伝送パワーが増大する、右上がりのチルトが発生している。これに対して、励起光の供給を行ってラマン増幅による補償を行った場合には、光伝送パワーの波長特性が比較的平坦なものに改善されている。

【0079】図27は、光増幅器8の出力端において測定した雑音指数(NF)の波長特性を示す図である。ここでも、ラマン励起光の供給状態に応じた雑音指数の波長特性がそれぞれ示してある。

【0080】図27に示すように、ラマン励起光を供給しない場合には、雑音指数がCバンド帯全域に亘って約

7dBとなっているのに対し、1430nmの励起光を供給した場合には、短波長側の雑音指数が大幅に改善されていることがわかる。長波長側の雑音指数については、1430nmの励起光だけを供給しても改善されず、逆に、WDMカプラ22bの挿入損失分に対応して若干劣化している。

【0081】この長波長側の伝送特性の改善のためには、上述の図18に示したように、1430nmおよび1485nmの2つの波長の励起光を所要の割合で供給すればよい。これにより、1430nmの励起光だけを供給したときに得られるラマン増幅の利得波長特性と同様の傾きを持ち、信号光帯域全体の利得を増大させた波長特性が実現されるため、WDMカプラ22bの挿入損失以上に補償されるようになり、図27に示すようにCバンド帯全域に亘る雑音指数の低減が図られる。

【0082】このように第1の実施形態のWDM光通信システムによれば、各中継区間の光伝送路7に励起光を供給してラマン増幅を発生させるとともに、チルトモニタ部3を設けてラマン増幅の利得波長特性を制御するようにしたことで、光伝送パワーの波長特性を自動的に補償することができ、優れた伝送特性を有するWDM光通信システムを実現することが可能となる。

【0083】次に、第2の実施形態について説明する。図28は、第2の実施形態のWDM光通信システムの要部構成を示すブロック図である。

【0084】図28のシステムは、例えば、光伝送路7および光増幅器8を中継伝送されてきたWDM信号光に生じる波長分散を、光受信装置6の前段に挿入された分散補償ファイバ(DCF)9によって補償する構成のWDM光通信システムについて、その分散補償ファイバ9をラマン増幅媒体とし、上述の基本構成を適用したものである。なお、このような伝送路の一部に分散補償ファイバ9を適用したシステムは、既存の1.3μm零分散SMF伝送路を利用して1.55μm帯のWDM信号光を高速伝送するために研究開発が進められているシステムである。図には受信側の要部構成のみが示してあり、送信側の構成については省略してある。

【0085】具体的には、分散補償ファイバ9の出力端と光受信装置6の入力端との間にWDMカプラ22bが設けられ、励起LD23<sub>1</sub>から出力される波長1430nmの励起光および励起LD23<sub>2</sub>から出力される波長1485nmの励起光をWDMカプラ22aで合波した励起光が、WDMカプラ22bを介して分散補償ファイバ9の後方側から供給される。また、ここでは光受信装置6で受信されたWDM信号光を用いて光伝送パワーの波長特性をモニタするチルトモニタ部3が設けられる。このチルトモニタ部3のモニタ結果はラマン増幅制御部4に送られて、該ラマン増幅制御部4から各励起LD23<sub>1</sub>, 23<sub>2</sub>に制御信号がそれぞれ伝達される。

【0086】分散補償ファイバ9は、光伝送路7の持つ

波長分散（および分散スロープ）が補償可能となるように設計された波長分散（および分散スロープ）を有する光ファイバである。この分散補償ファイバ9は、光伝送路7として用いられる1.3  $\mu\text{m}$ 零分散SMF等と比べて、モードフィールド径が例えば4.4  $\mu\text{m}$ のように小さいため、少ない励起光でラマン増幅を生じさせることができるという特徴を持つ。

【0087】このように第2の実施形態では、上述の図8に示した構成のラマン増幅発生部2が適用されたものであり、分散補償ファイバ9がラマン増幅媒体に相当する。また、チルト発生部1としては、光伝送路7、光増幅器8および分散補償ファイバ9が該当することになる。

【0088】かかる構成の第2実施形態では、図示しない光送信装置から送信され、光伝送路7および光増幅器8を介して中継伝送されたWDM信号光が、分散補償ファイバ9に送られることで、伝送により発生した波長分散が補償されるのと同時に、励起光の供給によるラマン増幅によって各チャネル間の光伝送パワーの波長特性が補償される。分散補償ファイバ9を通過したWDM信号光は、WDMカブラ22bを通過して光受信装置6で受信され、受信光の一部がチルトモニタ部に送られる。チルトモニタ部3では、受信されたWDM信号光についての光伝送パワーの波長特性がモニタされ、そのモニタ結果がラマン増幅制御部4にフィードバックされて、各励起LD231, 232の駆動状態が制御される。

【0089】このように第2の実施形態のWDM光通信システムによれば、伝送路上に設けられた分散補償ファイバ9に励起光を供給してラマン増幅を発生させるとともに、チルトモニタ部3を設けてラマン増幅の利得波長特性を制御するようにしたことによっても、光伝送パワーの波長特性を自動的に補償することができ、優れた伝送特性を有するWDM光通信システムを実現することが可能となる。特に、分散補償ファイバ9をラマン増幅媒体とすることによって、ラマン増幅の励起効率が高くなるため、ラマン励起光のパワーを小さくすることができる。

【0090】なお、上記第2の実施形態では、分散補償ファイバ9が最終段の光増幅器8と光受信装置6との間に配置された構成を示したが、本発明はこれに限られるものではなく、伝送路上の任意の位置に配置された分散補償ファイバをラマン増幅媒体として利用することが可能である。例えば、図29に示すように、光伝送路7の出力端と光増幅器の入力端との間に配置された分散補償ファイバ9'にラマン励起光を供給するようにしてもよい。

【0091】また、上述のように伝送路をラマン増幅する場合には、数百mWもの大きなパワーをもつ励起光が伝送路に入力することになるため、作業者等の安全を考慮することも重要である。具体的には、例えば、図30

に示すように、ラマン励起光がWDMカブラ22bから伝送路に入力するポイントのコネクタ（a点）が解放している場合には光パワーを安全なレベルまで低下させる機能を備える等の必要がある。図30の構成例では、WDMカブラ22a, 22bの間に分岐カブラを設け、該分岐カブラでa点からの反射戻り光と励起LDからの透過光がそれぞれ分岐され、アッテネータ（ATT）等を介してフォトダイオード（PD）で受光される。そして、フォトダイオードでのそれぞれの受光パワーがラマン増幅制御部4に送られて、反射光と透過光の受光パワー比により、a点におけるコネクタが外れていると判断してラマン用励起LDの電源をオフにして、a点の光レベルが安全なレベルとなるまで小さくされる。

【0092】次に、第3の実施形態について説明する。図31は、上述の基本構成を適用した第3の実施形態の光増幅器の構成を示すブロック図である。

【0093】図31において、本実施形態の光増幅器は、2段構成とした光増幅部（EDFA）81, 82の段間に可変光減衰器（VATT）83および分散補償ファイバ（DCF）84を配置した公知の光増幅器について、前記分散補償ファイバ84をラマン増幅媒体とし、上述の基本構成を適用したものである。

【0094】具体的には、前段の光増幅部81の入力端が本光増幅器の入力ポートINに接続される。光増幅部81の出力端には、可変光減衰器83および分散補償ファイバ84を介して後段の光増幅部82の入力端が接続される。光増幅部82の出力端には、可変光減衰器85を介して出力ポートOUTが接続される。

【0095】分散補償ファイバ84の出力端と後段の光増幅部82の入力端との間には、WDMカブラ22bが設けられ、励起LD231から出力される波長1430nmの励起光および励起LD232から出力される波長1485nmの励起光をWDMカブラ22aで合波した励起光が、WDMカブラ22bを介して分散補償ファイバ84の後方側から供給される。

【0096】さらに、後段の光増幅部82と出力ポートOUTとの間には、光カブラ3Aが配置され、該光カブラ3Aの分岐光を用いて光伝送パワーの波長特性をモニタするチルトモニタ部3が設けられる。このチルトモニタ部3のモニタ結果はラマン増幅制御部4に送られて、該ラマン増幅制御部4から各励起LD231, 232に制御信号が伝達される。

【0097】前段の光増幅部81および後段の光増幅部82としては、例えば、エルビウムドープファイバ（EDF）等の希土類元素ドープファイバを用いた光ファイバ増幅器がそれぞれ使用される。各光増幅部81, 82では、980nm帯または1480nm帯等の波長を有する励起光の供給を受けて励起状態とされたEDF内を、WDM信号光が伝搬することによって、各波長の信号光が一括して増幅される。ここでは、例えば前段の光

増幅部81の励起光波長を980nm帯として光増幅器の低雑音化を図り、後段の光増幅部82の励起光波長を1480nm帯として高出力化を実現するようにしている。

【0098】また、各光増幅部81, 82には、利得を一定に制御するAGC回路81A, 82Aがそれぞれ設けられている。各AGC回路81A, 82Aは、光増幅部81, 82の入力光及び出力光の一部を光カプラで分岐して各々の光パワーをモニタし、その光増幅部における利得が所要の一定値となるように励起光パワーの自動

制御を行う。

【0099】各光増幅部81, 82の後段にそれぞれ設けられた可変光減衰器83, 85は、外部からの信号により光減衰量を変化させることのできる公知の光減衰器である。これら各可変光減衰器83, 85の光減衰量は、ALC回路83A, 85Aから出力される信号によってそれぞれ制御される。各ALC回路83A, 85Aは、可変光減衰器83, 85の出力光の一部を光カプラで分岐して光パワーを測定し、出力光パワーが一定のレベルとなるように可変光減衰器83, 85の光減衰量を

制御する信号を発生する。

【0100】分散補償ファイバ84は、本光増幅器に接続される図示しない光伝送路等で発生する波長分散（および分散スロープ）が補償されるように設計された波長分散（および分散スロープ）を有する光ファイバである。この分散補償ファイバ84も、第2の実施形態で用いた分散補償ファイバ9と同様に、小さなモードフィールド径を有するため、励起光を供給した場合にラマン増幅を発生し易いという特徴を持つ。

【0101】このように第3の実施形態では、上述の図8に示した構成のラマン増幅発生部2が適用されたものであり、分散補償ファイバ84がラマン増幅媒体21に相当する。また、励起LD231, 232が励起光発生部に相当し、WDMカプラ22a, 22bが励起光供給部に相当する。さらに、チルト発生部1としては、本光増幅器に接続される光伝送路等が該当することになる。

【0102】かかる構成の光増幅器では、入力ポートINに入力されたWDM信号光が、前段の光増幅部81に送られ、AGC回路81Aの制御により利得一定で所要のレベルまで増幅される。光増幅部81から出力されたWDM信号光は、可変光減衰器83に送られ、ALC回路83Aの制御により所要の一定レベルとされた後、分散補償ファイバ84に送られる。分散補償ファイバ84では、本光増幅器に接続される伝送路等で発生する波長分散が補償されると同時に、波長1430nmおよび1485nmの各励起光の供給によるラマン増幅によって各チャネル間の光伝送パワーの波長特性が補償される。

【0103】分散補償ファイバ84を通過したWDM信号光は、WDMカプラ22b等を通過して後段の光増幅

部82に送られ、AGC回路82Aの制御により利得一定で所要のレベルまで増幅される。光増幅部82から出力されたWDM信号光は、可変光減衰器85に送られるとともに、その一部が光カプラ3Aで分岐されてチルトモニタ部3に送られる。

【0104】可変光減衰器85に送られたWDM信号光は、ALC回路85Aの制御により所要の一定レベルとされた後、出力ポートOUTから外部に出力される。一方、チルトモニタ部3では、後段の光増幅部82から出力されたWDM信号光についての光伝送パワーの波長特性がモニタされ、そのモニタ結果がラマン増幅制御部4にフィードバックされて、各励起LD231, 232の駆動状態が制御される。

【0105】このように第3の実施形態の光増幅器によれば、内蔵された分散補償ファイバ84に励起光を供給してラマン増幅を発生させるとともに、チルトモニタ部3を設けてラマン増幅の利得波長特性を制御するようにしたことで、光伝送パワーの波長特性を自動的に補償することができる。また、分散補償ファイバ84の挿入損失がラマン増幅により補償されるため、本光増幅器の雑音指数の低減を図ることができる。図32には、分散補償ファイバの挿入損失に対する光増幅器の雑音指数の変化の一例を示しておく。このような光増幅器を用いてWDM光通信システムを構成することにより、優れた伝送特性を有するWDM光通信システムを実現することが可能となる。

【0106】なお、上記第3の実施形態では、増幅されたWDM信号光のレベルを一定にする可変光減衰器83, 85が、各光増幅部81, 82の出力側にそれぞれ設けられる構成としたが、本発明はこれに限られるものではない。

【0107】例えば、図33に示すように、後段側の可変光減衰器85をWDMカプラ22bと光増幅部82の入力端との間に配置しても構わない。この構成の場合には、可変光減衰器85を光増幅部82の出力側に設けた場合と比較して、雑音特性が悪くなるものの励起効率の向上を図ることが可能になる。また、上記図31、図33の各構成において、前段側の可変光減衰器83およびALC回路83Aは省略することも可能である。

【0108】さらに、例えば図34に示すように、前段の光増幅部81の出力端と分散補償ファイバ84の入力端との間にのみ可変光減衰器83を設け、後段の光増幅部82から出力されるWDM信号光パワーをALC回路83Aでモニタして、本光増幅器の出力光レベルが一定となるように可変光減衰器83の光減衰量を制御するようにしてもよい。

【0109】また、上述した第1～3の実施形態では、ラマン増幅発生部2として図8に示した構成例を適用したが、これに限らず図4, 9～17に示した他の構成例を適用しても構わない。

【0110】次に、第4の実施形態について説明する。図35は、上述の基本構成を適用した第4の実施形態の光増幅器の構成を示すブロック図である。

【0111】図35に示す光増幅器は、例えば、上記第3の実施形態において前段の光増幅部81を構成するエルビウムドープ光ファイバ(EDF)をラマン増幅媒体とし、上述の基本構成を適用したものである。

【0112】具体的には、前段の光増幅部81の入力端が光アイソレータ86Aを介して入力ポートINに接続される。この光増幅部81は、EDF81a、励起LD81bおよびWDMカブラ81cを有し、励起LD81bで発生した980nm帯の励起光が、光アイソレータ86AとEDF81aの入力端との間に配置されたWDMカブラ81cを介して、EDF81aの前方側から供給される。また、励起LD81bは、AGC回路81Aによって利得一定制御されている。

【0113】前段の光増幅部81の出力端には、光アイソレータ86Bおよび可変光減衰器(VATT)83を介して、後段の光増幅部82の入力端が接続される。この光増幅部82は、EDF82a、励起LD82bおよびWDMカブラ82cを有し、励起LD82bで発生した1480nm帯の励起光が、EDF82aの出力端側に配置されたWDMカブラ82cを介して、EDF81aの後方側から供給される。また、励起LD82bは、AGC回路82Aによって利得一定制御されている。

【0114】前段の光増幅部81の出力端と光アイソレータ86Bの間には、WDMカブラ22が設けられ、励起LD23から出力される波長1430nmのラマン励起光が、WDMカブラ22を介してEDF81aの後方側から供給される。

【0115】後段の光増幅部82と出力ポートOUTとの間には、光カブラ3Aが配置され、該光カブラ3Aの分岐光を用いて光伝送パワーの波長特性をモニタするチルトモニタ部3が設けられる。このチルトモニタ部3のモニタ結果はラマン増幅制御部4に送られて、該ラマン増幅制御部4から励起LD23に制御信号が伝達される。

【0116】このように第4の実施形態では、上述の図4に示した構成のラマン増幅発生部2が適用されたものであり、EDF81aがラマン増幅媒体21に相当する。また、チルト発生部1としては、本光増幅器に接続される光伝送路等が該当することになる。

【0117】かかる構成の光増幅器では、入力ポートINに入力されたWDM信号光が、光アイソレータ86Aを介して前段の光増幅部81に送られ、WDMカブラ81cを通してEDF81aを伝搬する。このEDF81aには、励起LD81bで発生した980nm帯の励起光が前方より供給されているとともに、励起LD23で発生した1430nmのラマン励起光が後方より供給されているため、励起されたエルビウムの誘導放出作用に

よる増幅およびラマン増幅が発生する。このEDF81aにおけるラマン増幅によって各チャンネル間の光伝送パワーの波長特性が補償される。

【0118】そして、光増幅部81で所要のレベルまで増幅されたWDM信号光は、WDMカブラ22、光アイソレータ86bおよび可変光減衰器83を介して後段の光増幅部82に送られ、1480nm帯の励起光が供給されたEDF82aを伝搬することで所要のレベルまで増幅される。光増幅部82から出力されたWDM信号光は、出力ポートOUTから外部に出力されるとともに、その一部が分岐されてALC回路83Aおよびチルトモニタ部3に送られる。

【0119】ALC回路83Aでは、出力ポートOUTから出力されるWDM信号光のパワーが所要の一定レベルとなるように可変光減衰器83の光減衰量を制御する信号が生成されて、可変光減衰器83に伝えられる。また、チルトモニタ部3では、後段の光増幅部82から出力されたWDM信号光についての光伝送パワーの波長特性がモニタされ、そのモニタ結果がラマン増幅制御部4にフィードバックされて、励起LD23の駆動状態が制御される。

【0120】このように第4の実施形態の光増幅器によれば、EDF81aにラマン励起光を供給してラマン増幅を発生させるとともに、チルトモニタ部3を設けてラマン増幅の利得波長特性を制御するようにしたことによっても、光伝送パワーの波長特性を自動的に補償することができる。ただし、第3の実施形態の場合と比べると、EDFのモードフィールド径が分散補償ファイバよりも大きいので、所要のラマン増幅を発生させるためにより大きなパワーのラマン励起光が必要となる。

【0121】なお、上記第4の実施形態では、光増幅器内に分散補償ファイバを設けない構成を示したが、接続される光伝送路等で発生する波長分散等の補償が必要な場合には、可変光減衰器83と後段の光増幅部82の入力端との間などに分散補償ファイバを設けてもよい。また、前段のEDF81aにラマン励起光を供給する構成としたが、後段のEDF82aにラマン励起光を供給するようにしても構わない。さらに、ラマン励起光がEDF81aの後方側から供給される場合を示したが、EDF81aの前方側からラマン励起光を供給することも可能である。

【0122】次に、第5の実施形態について説明する。図36は、上述の基本構成を適用した第5の実施形態のWDM光通信システムの要部構成を示すブロック図である。

【0123】図36のシステムは、例えば、上記第4の実施形態において、誘導放出用の励起光とラマン増幅用の励起光とを合波してEDF81aに後方側から供給する共に、EDF81aを通過したラマン励起光のみが光増幅器8の入力側に接続される光伝送路7に送られるよ

うにした構成を有する。

【0124】具体的には、励起LD23<sub>1</sub>から出力される波長1.43μmの励起光と、励起LD23<sub>2</sub>から出力される波長1.48μmの励起光とが、WDMカブラ22aで合波された後に、前段のEDF81aと光アイソレータ86Bとの間に設けられたWDMカブラ22bを介して、EDF81aの後方側から供給される。各励起LD23<sub>1</sub>、23<sub>2</sub>の駆動状態は、上述した各実施形態の場合と同様に、チルトモニタ部3のモニタ結果に従ってラマン増幅制御部4により制御される。

【0125】また、EDF81aの前段には、1つのポートP<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>、P<sub>3</sub>を有する光サーキュレータ100が設けられる。この光サーキュレータ100は、ポートP<sub>1</sub>からポートP<sub>2</sub>に向かう方向、ポートP<sub>2</sub>からポートP<sub>3</sub>に向かう方向およびポートP<sub>3</sub>からポートP<sub>1</sub>に向かう方向にのみ光を伝達する一般的な光部品である。ポートP<sub>1</sub>には入力側の光伝送路7が例えばスプライス等により接続される。また、ポートP<sub>2</sub>にはEDF81aの信号光入力端が接続され、ポートP<sub>3</sub>にはWDMカブラ101が接続される。このWDMカブラ101は、光サーキュレータ100のポートP<sub>3</sub>からの出力光を信号光成分と励起光成分とに分波する。WDMカブラ101の信号光成分の出力ポートの先は終端器102によって終端され、励起光成分の出力ポートの先には、例えば鏡などの反射率の高い媒体103が配置される。したがって、ここでは光サーキュレータ100、WDMカブラ101、終端器102および反射媒体103が、励起光伝達手段として機能することになる。なお、上記以外の光増幅器8の構成（後段の光増幅器82など）は、前述した第4の実施形態の場合と同様である。

【0126】上記のようなシステムでは、光伝送路7を伝搬してきたWDM信号光が、光サーキュレータ100のポートP<sub>1</sub>に入射されポートP<sub>2</sub>からEDF81aに送られる。このEDF81aでは、励起LD23<sub>1</sub>からの波長1.43μmの励起光および励起LD23<sub>2</sub>からの波長1.48μmの励起光がWDMカブラ22a、22bを介して供給されることで、励起されたエルビウムの誘導放出作用によりWDM信号光が増幅されると同時に、各波長の励起光によってラマン増幅も発生する。EDF81aで増幅されたWDM信号光は、WDMカブラ22bを通過して光アイソレータ86Bに送られると共に、その一部が各光部品の接続点等で反射されてEDF81a内を逆方向に伝搬する。このWDM信号光の反射戻り光およびEDF81aを通過した各波長の励起光は、光サーキュレータ100のポートP<sub>2</sub>に入射されポートP<sub>3</sub>からWDMカブラ101に送られる。WDMカブラ101では、ポートP<sub>3</sub>からの出力光が信号光成分と励起光成分とに分波され、該分波された信号光成分は終端されることによって抑圧される。一方、励起光成分は、媒体103によって反射されて、WDMカブラ10

1を介して光サーキュレータ100のポートP<sub>3</sub>に戻される。ポートP<sub>3</sub>に戻された励起光成分は、ポートP<sub>1</sub>から光伝送路7に送られて、光伝送路7内でラマン増幅を発生させるようになる。

【0127】このように本実施形態では、EDF81a用の励起光とラマン増幅用の励起光とを合波して、主信号系に挿入した1つのWDMカブラ22bを介してEDF81aに後方側から供給し、さらに、EDF81aの通過先には光サーキュレータ100を配置して、励起光成分のみを光伝送路7に伝えるようにしたことで、EDF81aおよび光伝送路7でラマン増幅が発生して、光伝送パワーの波長特性の補償が行われるようになる。上記のような構成では、主信号系に挿入する光部品の点数を減らすことができ、かつ、挿入損失の大きな光アイソレータを光増幅器8の入力段に設ける代わりに、挿入損失の比較的小さな光サーキュレータ100を使用して（例えば、挿入損失が0.8dB程度の光サーキュレータが実用化されている）、光アイソレータと同等の機能を実現できるため、光SNRの一層の向上を図ることが可能になる。

【0128】また、光増幅器8の入力段における損失が低減されることで、前段のEDF81aの長さを短尺化することが可能になる。このEDF81aの短尺化により、利得一定制御（AGC）を敢えて適用する必要がなくなる。これは、EDF81aへの入力レベルに対する利得特性が、図37に示すようにEDF81aの長さによって変化することによる。すなわち、図37で破線に示すように、EDF81aの長さが長い場合には、入力レベルの変化に対して利得一定になる範囲が狭くなる。一方、図37で実線に示すように、EDF81aの長さが短い場合には、入力レベルの変化に対して利得一定になる範囲が広くなる。このため、EDF81aの短尺化によりAGCを行う必要がなくなるようになる。

【0129】さらに、ラマン増幅用の励起光波長とEDF用の励起光波長とを同じ1.48μmに設定したことで、各々の励起LDを共通化できる。これにより、光増幅器8の構成の簡略化および低コスト化を図ることが可能になる。

【0130】なお、上記第5の実施形態では、光サーキュレータ100を使用してラマン励起光のみを光伝送路に伝える構成を示したが、例えば図38に示すように、一般に光増幅器の入力段に挿入されている光アイソレータをそのまま使用して励起光のみを光伝送路に伝える構成も可能である。

【0131】図38の構成例は、上記第5の実施形態で用いた光サーキュレータ100の位置に、光アイソレータ86Aを設け、該光アイソレータ86Aの前後にそれぞれWDMカブラ104、105を挿入し、ラマン励起光が光アイソレータ86Aを迂回して光伝送路7に送られるようにしたものである。各WDMカブラ104、1



05は、一方の側のポートに入力された光を信号光成分と励起光成分に分波して他方の側の2つのポートにそれぞれ出力するものである。ここでは、信号光成分の出力ポートが光アイソレータ86Aにそれぞれ接続され、励起光成分の出力ポートが互いに接続される。これにより、光伝送路7から光増幅器8に入力されるWDM信号光は、WDMカブラ104、光アイソレータ86AおよびWDMカブラ105を順に通ってEDF81aに送られる。また、EDF81aを通過したラマン励起光およびWDM信号光の反射戻り光は、WDMカブラ105で信号光成分と励起光成分に分波され、信号光成分は光アイソレータ86Aに送られて減衰される。一方、WDMカブラ105で分波された励起光成分は、光アイソレータ86Aを迂回しWDMカブラ104を通して光伝送路7に送られるようになる。ただし、上記のような構成とした場合には、主信号系に挿入される光分品が多くなるため、光SNRに関しては光サーキュレータを用いた構成の方が有利である。

【0132】なお、上述した第1～5の実施形態では、Cバンド帯のWDM信号光に対するラマン励起波長として1.43 $\mu$ mまたは1.49 $\mu$ mを用いる場合を例示して説明したが、本発明で用いるラマン励起光の波長および波長数は上記の場合に限られるものではない。例えば、上述の図24にも例示したように、1.43 $\mu$ mおよび1.47 $\mu$ mの各励起光を所要の割合で組み合わせることでラマン増幅を起こさせることにより、最適な補償特性が得られるようになる場合もある。

【0133】さらに、ラマン増幅の利得波長特性は、基本的に、利得ピークを外した波長域での単位波長当たりの利得特性が良い線形性を有するとして説明を行った。しかし、この利得特性の線形性について詳しくみると、図39(a)に示すように、ラマン励起光パワーに依存しない「うねり」があることが確認されており、この線形性の誤差は、図39(b)に示すように $\pm 0.5$  dB程度であると考えられる。

【0134】このようなラマン増幅の利得波長特性のうねりをキャンセルする必要がある場合は、例えば、損失波長特性が固定の光フィルタ等を使用するのが有効である。具体例を挙げると、第3の実施形態のように光増幅器内の分散補償ファイバをラマン増幅してチルトを制御する場合、後段の光増幅部に対してEDFの利得波長特性を打ち消すために適用される光フィルタ(第3の実施形態では使用していないが、このような光フィルタを用いる場合も多い)について、上記ラマン増幅の利得波長特性のうねり分を取り入れて設計すれば、1つの光フィルタによってEDFの利得波長特性およびラマン増幅の利得波長特性のうねりの両方を取り扱うことができる。また、励起波長をより増やす方法も有効である。例えば、図39において1550 nmの利得が他の波長よりも小さい。そこで、この1550 nmに利得ピークをも

つ励起波長(例えば1450 nm等)を加えてラマン増幅することで「うねり」を小さくできる。

【0135】また、上述した第1～5の実施形態では、Cバンド帯の信号光についてチルト補償を行う場合を説明したが、本発明はこれに限られるものではなく、より広い信号光帯域、例えば1535～1605 nm(Cバンド帯+Lバンド帯)についてチルト補償を行う応用も可能である。この場合には、複数の励起波長を組み合わせ、それぞれのラマン励起光パワーの割合を調整して、ラマン増幅の波長特性を制御すればよい。

【0136】図40には、Cバンド帯+Lバンド帯について、3つの波長を組み合わせることでラマン励起させる場合のシステム構成の一例を示しておく。図40(a)の構成は、上述した第1の実施形態の場合と同様にして、光伝送路をラマン増幅媒体とした場合の一例を示したものである。ここでは、光伝送路からのWDM信号光を分波器によりCバンド帯およびLバンド帯に分波し、各バンド帯の信号光をCバンド帯用光増幅器およびLバンド帯用光増幅器を用いてそれぞれ増幅し、さらに合波器で合波するとともに、3つの波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ のラマン励起光をWDMカブラで合波して光伝送路に供給し、ラマン増幅を発生させるものとする。

【0137】さらに図40(b)では、各光増幅部(CバンドとLバンド)への入力光の一部がそれぞれ入力される入力モニタ部を含み、該入力モニタ部の各モニタ結果を受けて、ラマン増幅制御部は、各増幅部の入力レベルが所定の値になるようにラマン励起光パワーの割合を調整して、ラマン増幅の波長特性を制御する。具体的には、例えば、各増幅部の入力光レベルが等しくなるように制御が行われる。

【0138】図41には、短波長側が3 dB劣化するチルトを補償する場合のラマン利得の設定例を示しておく。なお、(a)は1.43 $\mu$ mおよび1.47 $\mu$ mの2波長を組み合わせることで励起した場合を示し、(b)は1.43 $\mu$ mおよび1.47 $\mu$ mに1.465 $\mu$ mを加えて、3つの波長を組み合わせることで励起した場合を示したものである。また、図42には、短波長側が5 dB以上劣化するチルトを補償する場合のラマン利得の設定例を示しておく。なお、(a)は1.43 $\mu$ mおよび1.45 $\mu$ mの2波長を組み合わせることで励起した場合を示し、

(b)は1.43 $\mu$ mおよび1.45 $\mu$ mに1.49 $\mu$ mを加えて、3つの波長を組み合わせることで励起した場合を示したものである。1.49 $\mu$ mを加えて励起光波長を3波で構成したことで、発生するチルトに対応した傾きを保った状態で信号光帯域全体の利得を大きくでき、光SNR比の向上を図ることができる。本例では、1.49 $\mu$ mの励起光が利得向上に寄与し、1.43 $\mu$ mと1.45 $\mu$ mが、短波長側劣化チルトの補償に寄与している。なお、チルト補償と同時に利得増加を行うので、(b)の場合は(a)の場合よりも大きな励起光パワー



が必要になる。

【0139】各図に示すように、励起波長の組み合わせの数を増やすことによって、補償可能な波長特性の形態も増えることになり、チルトの補償精度をより向上させることが可能である。また、上記のような場合にも、チルトモニタ部のモニタ結果に応じて各ラマン励起光の駆動状態を制御するときは、例えば、長波長側の励起光を一定にして、短波長側の1波または2波の励起光を変化させることにより、伝送光パワーの右上がりの波長特性の変化を効果的に補償することができるようになる。このとき、短波長側の信号をより大きく補償するには、短波長側の励起光の光パワーをより増やせばよい。

【0140】さらに、上述した第1～5の実施形態では、ラマン増幅の利得波長特性を制御するために、ラマン励起光のパワーや各波長光の割合を調整するようにしたが、これ以外にも、例えばラマン用励起LDの制御温度を調整してラマン利得の波長特性を制御することも可能である。具体的には、例えば励起LDの温度を10℃高くして制御すると、励起光波長が5nm程度長波長側にシフトするので、このラマン用励起LDの制御温度をラマン利得の波長特性を変化させるパラメータの1つとすることができる。

【0141】ここで、ラマン増幅媒体からの出力光パワーをモニタし、該モニタ結果をラマン増幅制御に反映させるようにした場合の具体的な構成について説明する。図43は、出力光パワーのモニタ過程を付加した本発明による制御方法が適用された装置の基本構成を示すブロック図である。

【0142】図43の構成は、例えば上述の図8に示したような基本構成について、ラマン増幅媒体の出力光パワーをモニタする光パワーモニタ部101を設けたものである。該光パワーモニタ部101のモニタ結果とチルトモニタ部3のモニタ結果は、ラマン増幅制御部4に送られて、ラマン増幅制御部4から各励起LDに制御信号がそれぞれ伝達される。つまり、ラマン増幅媒体21の出力光パワーを所定値に保ち、かつ、光伝送パワーの波長特性を平坦化することを、各波長帯（2波長以上、図には2波長の場合を示した）のラマン励起光の割合を調整して実現している。

【0143】なお、図43では、チルトモニタ部3と光パワーモニタ部101とを別個に設けた場合を示したが、例えば、図44に示すように、チルトモニタ部と光パワーモニタ部を一体化した構成も可能である。

【0144】図45には、ラマン増幅によるチルト補償と同時にラマン増幅媒体からの出力光パワーを所望のレベルに制御した場合の実験結果を示しておく。なお、本実験は、100kmの伝送路（ラマン増幅媒体）を後方励起によりラマン増幅し、励起光は3波長（1.43μm、1.45μmおよび1.49μm）を用いた。また、入力信号光は、1535nm～1600nmの64

波で、2dBm/c hの一定な光パワーで伝送路に入力した。図45（a）は、各波長の励起光パワーを調整して、伝送路の出力パワーを一定にしつつ（光パワーメータにより測定）、利得波長特性を変化させたときの伝送路の出力スペクトルの結果である。図45（b）は、各波長の励起光パワーを調整して、所定の利得波長特性を保持しつつ、伝送路の出力パワーを変化させたときの結果である。

【0145】ところで、WDM光通信システムに適用する光増幅器には、入力光レベルが変化しても利得波長特性および出力光レベルが一定であることが要求される。この要求は、各光増幅器の入力光レベルは伝送路長等により変化するが、この変化を各光増幅器で補償して、より少ない品種の光増幅器でシステムを構築するために必要とされる。上記の要求を満たすためには、例えば特開平8-248455号公報や特開平6-169122号公報などで開示されているように、複数の光増幅部を用い、各光増幅部を利得一定制御し、段間には可変光アッテネータを適用して出力一定制御を行う方法が有力である。しかし、この構成では、可変光アッテネータの光減衰量により雑音特性の劣化を招いたり、制御が煩雑になるなどの課題が残されている。

【0146】本発明による制御方法は、上記のような公知の光増幅器の課題を解決する1つの手段としても有用である。すなわち、ラマン増幅によりチルト補償を行いつつも光増幅器の入力もしくは出力を一定に制御することで、これまで入力ダイナミックレンジのために必要であった光増幅器の可変光アッテネータが不要になり、光通信システムの光SNRの改善、低コスト化、構成の簡易化が実現可能になる。

【0147】図46は、上記のような本発明による制御方法を適用した光増幅器の基本構成例を示すブロック図である。図46の光増幅器は、一般的な光増幅器に予め搭載されている、入力光パワーや出力光パワーをモニタする機能を利用して構成したものである。ここでは、一例として、光増幅器の入力側にチルトモニタ部と光パワーモニタの両者を適用した構成が示してある。このような構成の光増幅器を適用した光通信システムの全体構成の一例を図47に示しておく。

【0148】なお、チルトモニタ部および光パワーモニタは、上記の配置に限らず、光増幅器の出力側、またはどちらか一方を入力側、他方を出力側に配置する構成としてもよい。また、図46には、チルトモニタ部および光パワーモニタを個別に配置する構成を示したが、図48に示すように、両機能を一体化することも可能である。

【0149】ここで、より具体的な構成として、2段構成の光増幅部の段間に分散補償ファイバを配置した光増幅器に本発明の制御方法を適用した場合を考える。図49～図52は、上記のような光増幅器の構成を例示した

ブロック図である。

【0150】各図に示すような構成とすることにより、従来、入力ダイナミックレンジのために必要であった可変光アッテネータが不要となり、光増幅器の構成および制御の簡易化を実現できる。さらに、前段の光増幅部で要求されていた利得をラマン増幅によって担うことができ、前段の光増幅部を省略することも可能になる。前段の光増幅部を省略した場合の構成を図53に示しておく。ただし、この場合、分散補償ファイバの入力レベルが所定値を満たすべく、ラマン増幅には大きな励起光パワーが必要になる。

【0151】さらに、上記の分散補償ファイバをラマン増幅媒体として利用することも可能である。この場合の構成例を図54に示しておく。なお、分散補償ファイバはモードフィールド径が比較的小さく、非線形効果が顕著に現れるため、小さな励起光パワーで所望のラマン利得を得ることができるが、ラマン増幅の利得値はシステムの光SNRと非線形効果に注意を払って設計する必要がある。また、図54では、一例として光増幅器8の出力側に、チルトモニタ部3と光パワーモニタ部101の両者を配置したが、光増幅器8の入力側、または、どちらか一方を入力側、他方を出力側に配置する構成としてもよく、さらには、チルトモニタ部3と光パワーモニタ部101を一体化した構成としても構わない。

【0152】ここで、光通信システムの信号数（波長数）が変化する場合のラマン増幅制御部の制御方法について簡単に説明しておく。ラマン増幅は入力パワーが変化しても励起光パワー一定の条件において同じ利得を示す非飽和領域が広いという特徴がある（図6参照）。このラマン増幅の特性を利用して、光通信システムの信号数（波長数）が変化する場合のラマン増幅制御を行う。

【0153】具体的には、例えば図55に示すような構成において、まず、ラマン増幅制御部4は、監視信号処理部により波長数が変化するという情報を受けると、チルト制御および出力一定制御の状態から、現状の励起光パワーの値に保持した励起光パワー一定制御の状態に切り換える。これにより波長数が変動しても利得波長特性が一定に保持されるため、各波長における出力レベルは一定となる。そして、波長数の変化後には、通常のチルト制御および出力一定制御に戻すようにする。なお、この時、波長数情報から所定の出力レベルが算出され、その結果が出力一定制御に反映される。

【0154】

【発明の効果】以上説明したように、本発明のラマン増幅による光伝送パワーの波長特性制御方法およびそれを用いたシステム等によれば、光伝送パワーに波長特性が生じたWDM信号光に対して、ラマン増幅の利得波長特性を利用して波長特性の補償を行い、加えて、ラマン増幅後の光伝送パワーの波長特性をモニタしてラマン増幅の利得波長特性を制御するようにしたことで、光伝送パ

ワーの波長特性を自動的に補償することができ良好な伝送特性を実現することが可能になる。

【0155】また、複数の波長帯のラマン励起光を用いるようにしたことで、ラマン増幅の利得波長特性をより高度に制御することができる。さらに、ラマン増幅媒体として、モードフィールド径の小さい光ファイバを用いれば、より小さなパワーのラマン励起光により所要のラマン増幅を発生させることができる。

【0156】さらに、光増幅器の入力側の伝送路もしくは分散補償ファイバをラマン増幅して、光増幅器の入力レベルを一定に制御しつつ、チルト補償を行うことで、光増幅器の構成の簡易化と、伝送特性の向上とを実現できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係るラマン増幅による光伝送パワーの波長特性の制御方法を用いた装置の基本構成を示すブロック図である。

【図2】ラマン増幅について、励起波長に対する利得ピーク波長を示す図である。

【図3】ラマン増幅について、励起波長に対する信号光帯域の利得傾斜量を示す図である。

【図4】図1の基本構成のラマン増幅発生部について、1波長の励起光が供給される後方励起型の具体的な構成の一例を示す図である。

【図5】励起波長を1430nmとしたときのラマン増幅の利得波長特性を示す図であって、(a)はラマン増幅媒体がSMFの場合、(b)はラマン増幅媒体が分散シフトファイバの場合を示す図である。

【図6】ラマン増幅の利得波長特性について、ラマン励起光パワーおよび入力パワーを変化させたときの一例を示す図である。

【図7】励起波長を1485nmとしたときのラマン増幅の利得波長特性を示す図であって、(a)はラマン増幅媒体がSMFの場合、(b)はラマン増幅媒体が分散シフトファイバの場合を示す図である。

【図8】ラマン増幅発生部について、2波長の励起光が後方から供給される場合の具体的な構成の一例を示す図である。

【図9】ラマン増幅発生部について、2波長の励起光が供給される前方励起型の具体的な構成の一例を示す図である。

【図10】ラマン増幅発生部について、2波長の励起光が供給される双方向励起型の具体的な構成の一例を示す図である。

【図11】ラマン増幅発生部について、複数の励起LDで発生した2波長の励起光が供給される後方励起型の具体的な構成の一例を示す図である。

【図12】ラマン増幅発生部について、複数の励起LDで発生した2波長の励起光が供給される前方励起型の具体的な構成の一例を示す図である。

【図 13】ラマン増幅発生部について、複数の励起 LD で発生した 2 波長の励起光が供給される双方向励起型の具体的な構成の一例を示す図である。

【図 14】図 11 の後方励起型と図 12 の前方励起型とを組み合わせる双方向励起型とした構成例を示す図である。

【図 15】ラマン増幅発生部について、2 波長の励起光が WDM 合波器を介して供給される後方励起型の具体的な構成の一例を示す図である。

【図 16】ラマン増幅発生部について、2 波長の励起光が WDM 合波器を介して供給される前方励起型の具体的な構成の一例を示す図である。

【図 17】ラマン増幅発生部について、2 波長の励起光が WDM 合波器を介して供給される双方向励起型の具体的な構成の一例を示す図である。

【図 18】励起波長を 1430 nm および 1485 nm としたときに得られるラマン増幅の利得波長特性の一例を示す図である。

【図 19】図 1 の基本構成のチルトモニタ部について、具体的な構成の一例を示す図である。

【図 20】図 19 のチルトモニタ部で抽出される ASE 光の概容を示す図である。

【図 21】チルト発生部で生じる光伝送パワーの波長特性を示す図である。

【図 22】図 21 に示したチルトを補償するラマン増幅の利得波長特性を示す図である。

【図 23】ラマン増幅発生部を通過した WDM 信号光パワーの波長特性を示す図である。

【図 24】1. 47  $\mu$ m の励起光パワーを一定とし、1. 43  $\mu$ m の励起光パワーを変化させたときのラマン利得の波長特性を示した図であって、(a) は、1. 47  $\mu$ m の励起光パワーを 83 mW で一定とした場合の測定結果であり、(b) は、1. 47  $\mu$ m の励起光パワーを 133 mW で一定とした場合の測定結果である。

【図 25】本発明による第 1 の実施形態の WDM 光通信システムの全体構成を示すブロック図である。

【図 26】同上第 1 の実施形態について、光増幅器から出力される WDM 信号光パワーの波長特性を示す図である。

【図 27】同上第 1 の実施形態について、光増幅器の出力端で測定した雑音指数の波長特性を示す図である。

【図 28】本発明による第 2 の実施形態の WDM 光通信システムの要部構成を示すブロック図である。

【図 29】同上第 2 の実施形態に関する他の構成例を示すブロック図である。

【図 30】伝送路をラマン増幅させる場合にコネクタ解放を検出可能にした構成例を示すブロック図である。

【図 31】本発明による第 3 の実施形態の光増幅器の構成を示すブロック図である。

【図 32】同上第 3 の実施形態について、分散補償フ

ィバの挿入損失に対する光増幅器の雑音指数の変化の一例を示す図である。

【図 33】同上第 3 の実施形態に関する他の構成例を示すブロック図である。

【図 34】同上第 3 の実施形態に関するさらに別の構成例を示すブロック図である。

【図 35】本発明による第 4 の実施形態の光増幅器の構成を示すブロック図である。

【図 36】本発明による第 5 の実施形態の WDM 光通信システムの要部構成を示すブロック図である。

【図 37】同上第 5 実施形態について EDF の長さを入力レベルに対する利得特性との関係を説明する図である。

【図 38】同上第 5 実施形態に関して、光アイソレータを使用した場合の構成例を示すブロック図である。

【図 39】ラマン増幅の利得波長特性の線形性に関する図であって、(a) は利得波長特性のゆらぎを示し、(b) は線形性からの誤差を表す図である。

【図 40】C、L バンド帯のチルト補償を行う場合のシステム構成の一例を示すブロック図であって、(a) は光増幅器の出力側にチルトモニタを配置した構成であり、(b) は光増幅器の入力側に入力モニタを配置した構成である。

【図 41】C、L バンド帯のチルト補償を行う場合のラマン増幅の利得波長特性を示す図であって、(a) は 2 波長を組み合わせた場合、(b) は 3 波長を組み合わせた場合を示す図である。

【図 42】C、L バンド帯のチルト補償を行う場合の他のラマン増幅の利得波長特性を示す図であって、(a) は 2 波長を組み合わせた場合、(b) は 3 波長を組み合わせた場合を示す図である。

【図 43】出力光パワーのモニタ過程を付加した本発明による制御方法が適用された装置の基本構成を示すブロック図である。

【図 44】図 43 の基本構成について、チルトモニタ部と光パワーモニタ部を一体化した構成を示すブロック図である。

【図 45】ラマン増幅によるチルト補償および出力一定制御を行った場合の実験結果を示す図であって、(a) は出力光パワーを一定とした場合、(b) は所定の利得波長特性を保持した場合を示すものである。

【図 46】本発明におけるラマン増幅によるチルト補償および出力一定制御を適用した光増幅器の基本構成を示すブロック図である。

【図 47】図 46 の光増幅器を適用した光通信システムの全体構成の一例を示す図である。

【図 48】図 46 の基本構成について、チルトモニタ部と光パワーモニタの機能を一体化した構成を示すブロック図である。

【図 49】本発明による制御方法を分散補償ファイバを

有する光増幅器に適用した構成を示す図であって、入力側で光パワーモニタを行い、出力側でチルトモニタを行うときの一例を示す図である。

【図50】本発明による制御方法を分散補償ファイバを有する光増幅器に適用した構成を示す図であって、入力側で光パワーモニタおよびチルトモニタを行うときの一例を示す図である。

【図51】本発明による制御方法を2段構成で分散補償ファイバを有する光増幅器に適用した構成を示す図であって、出力側で光パワーモニタを行い、出力側でチルトモニタを行うときの一例を示す図である。

【図52】本発明による制御方法を2段構成で分散補償ファイバを有する光増幅器に適用した構成を示す図であって、出力側で光パワーモニタを行い、入力側でチルトモニタを行うときの一例を示す図である。

【図53】図52の構成例について、前段の光増幅部を省略した場合の構成を示す図である。

【図54】図53に関連して、分散補償ファイバをラマン増幅媒体として利用する場合の構成例を示す図である。

【図55】本発明による制御方法について、光通信システムの信号数（波長数）が変化する場合の制御動作を説明する図である。

【符号の説明】

1…チルト発生部

2…ラマン増幅発生部

3…チルトモニタ部

4…ラマン増幅制御部

5…光送信装置（OS）

6…光受信装置（OR）

7…光伝送路

8…光増幅器

9, 84…分散補償ファイバ（DCF）

21…ラマン増幅媒体

22, 22a, 22b, 22<sub>1</sub>, 22<sub>2</sub>, 81c, 82c, 101, 104, 105…WDMカプラ

23, 23<sub>1</sub>, 23<sub>2</sub>, 81b, 82b…励起LD

25<sub>1</sub>, 25<sub>2</sub>…直交偏波合波器（PBS）

26…WDM合波器（WDM MUX）

81, 82…光増幅部

81A, 82A…AGC回路

81a, 82a…エルビウムドープ光ファイバ（EDF）

83, 85…可変光減衰器（VATT）

83A, 85A…ALC回路

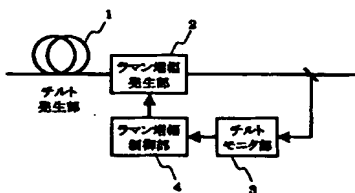
100…光サーキュレータ

101…光パワーモニタ部

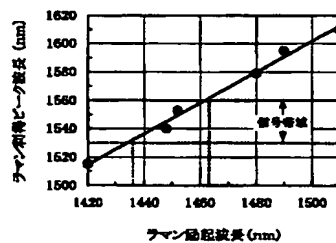
IN…入力ポート

OUT…出力ポート

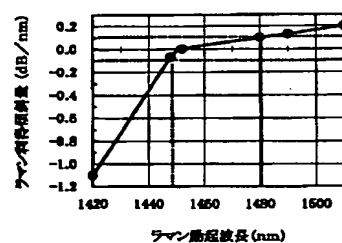
【図1】



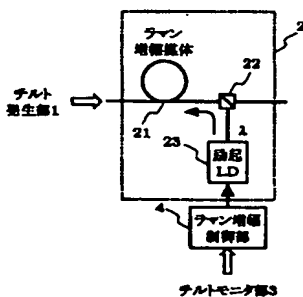
【図2】



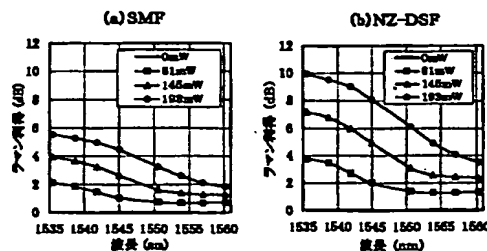
【図3】



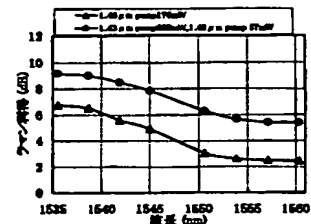
【図4】



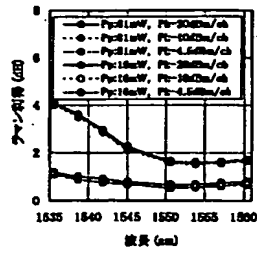
【図5】



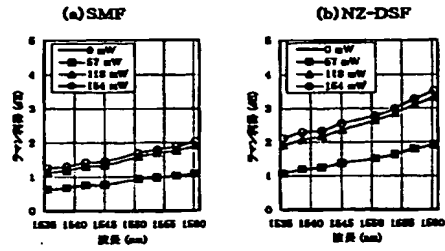
【図18】



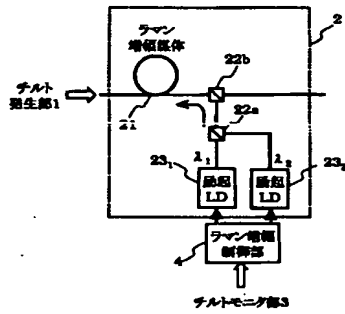
【図6】



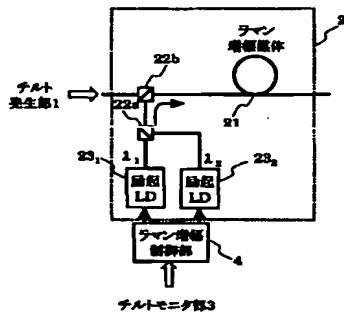
【図7】



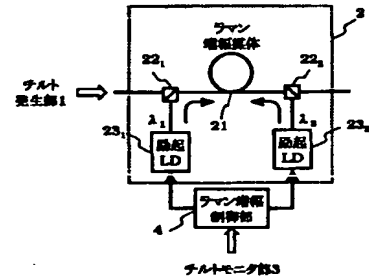
【図8】



【図9】

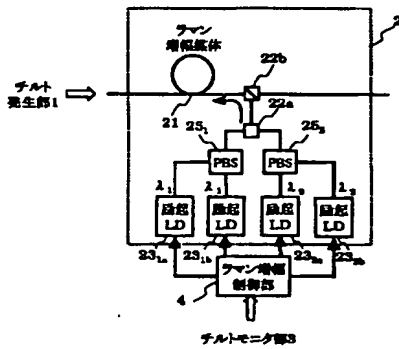


【図10】

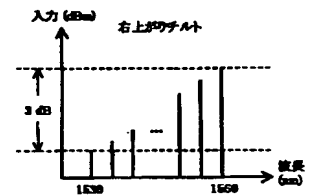
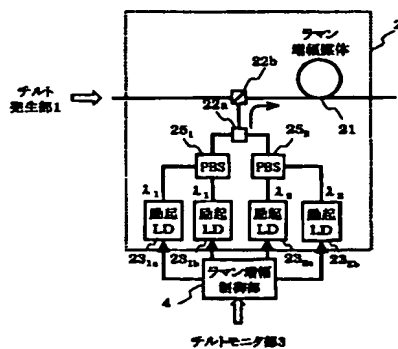


【図21】

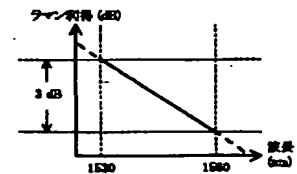
【図11】



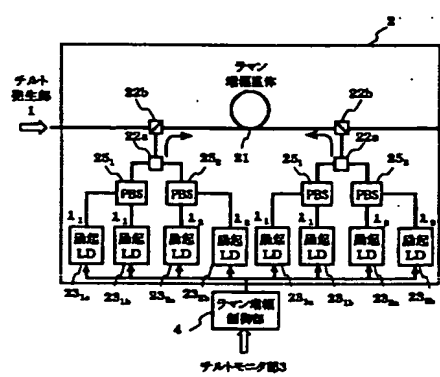
【図12】



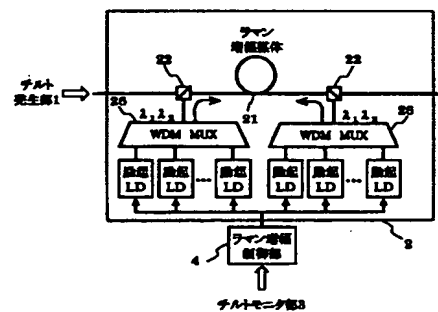
【図22】



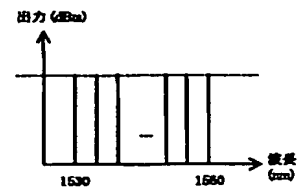
【图 14】



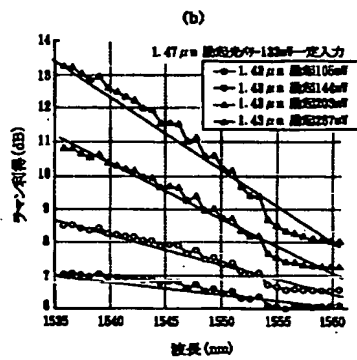
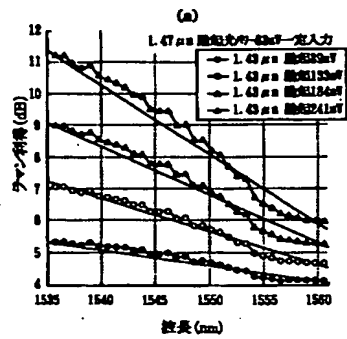
【图 17】



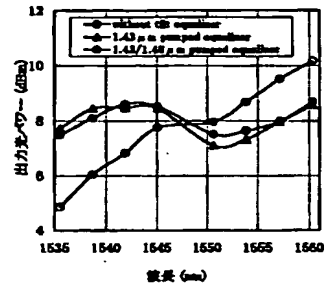
【图 2 3】



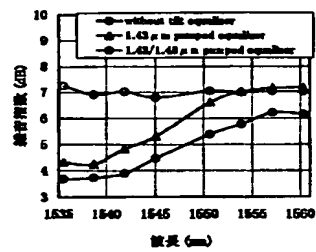
【図24】



【図26】

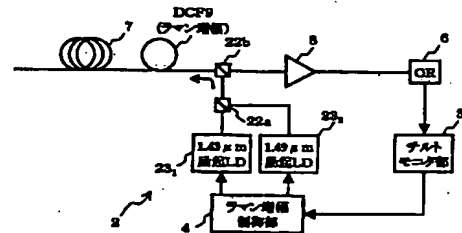
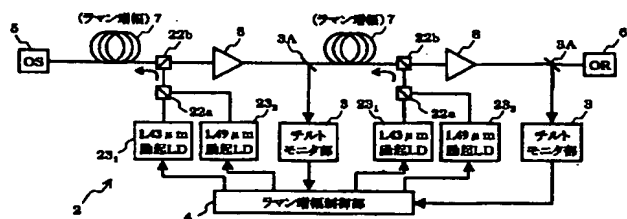


【図27】

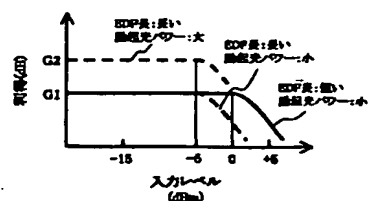


【図29】

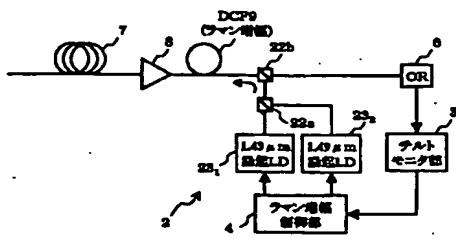
【図25】



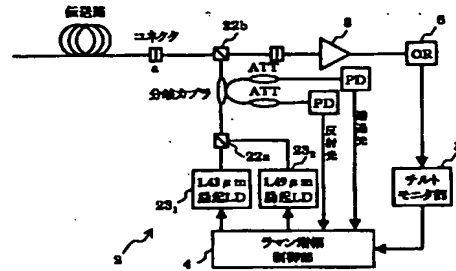
【図37】



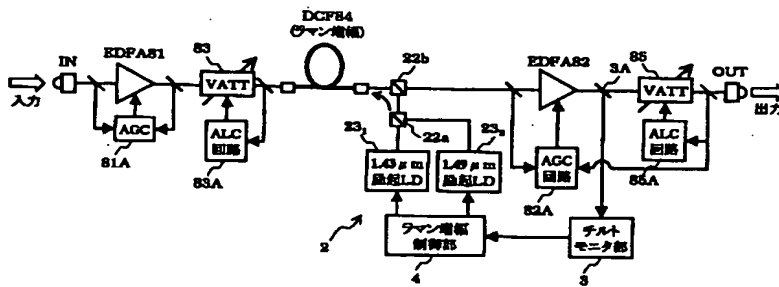
【図28】



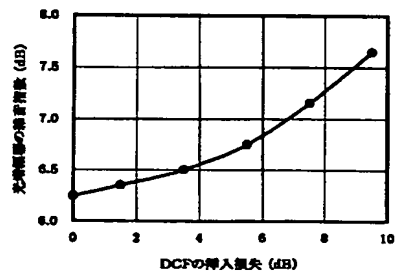
【図30】



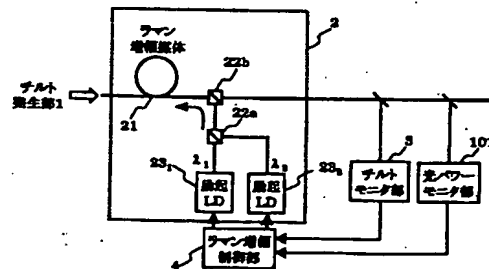
【図31】



【図32】

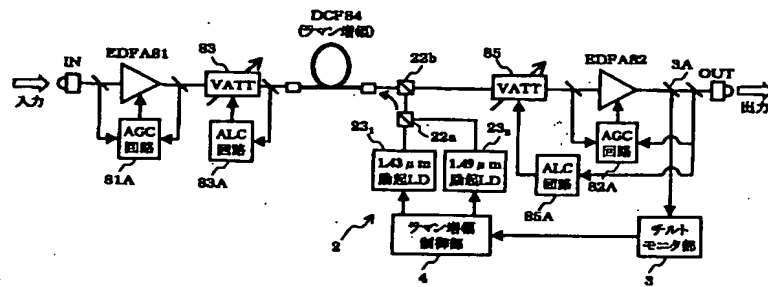


【図43】

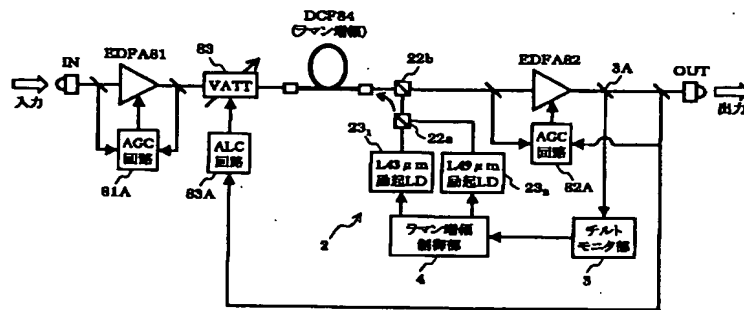




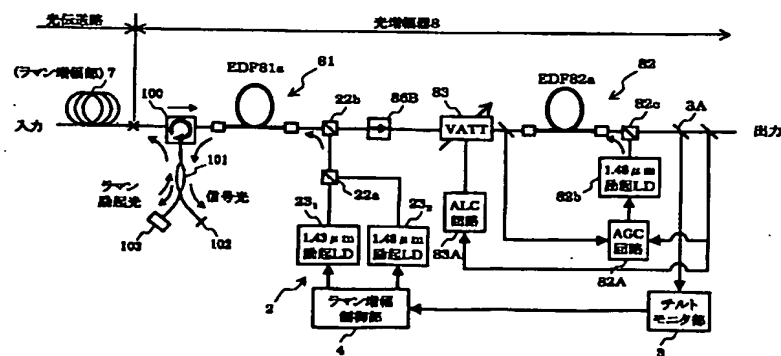
【図33】



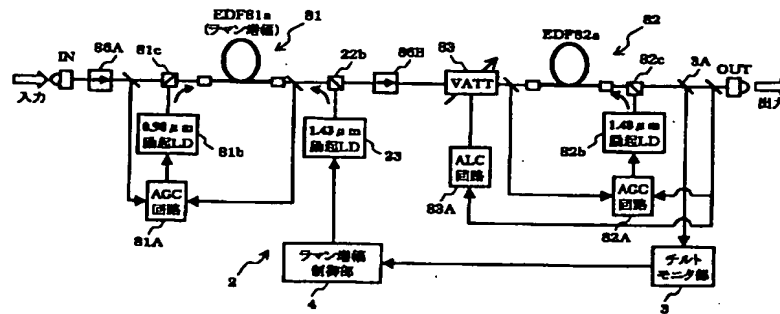
【図34】



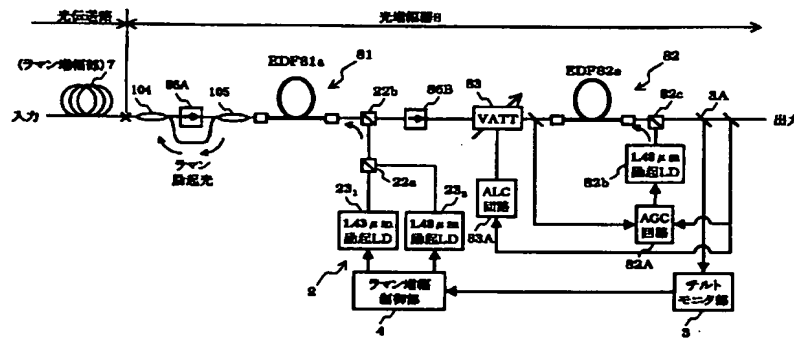
【図36】



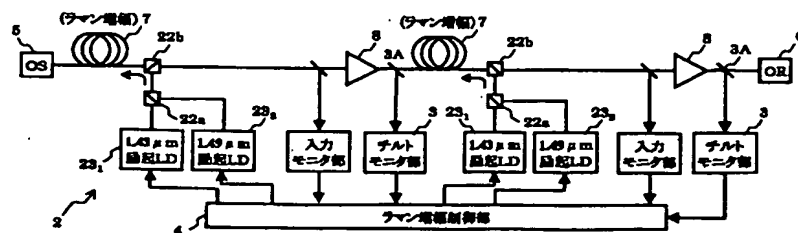
【図35】



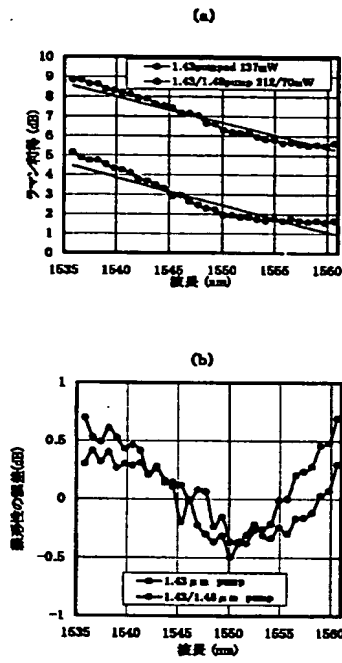
【図38】



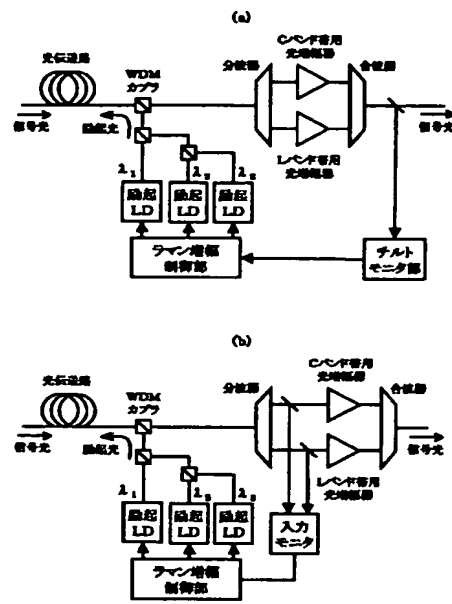
【図47】



【図39】

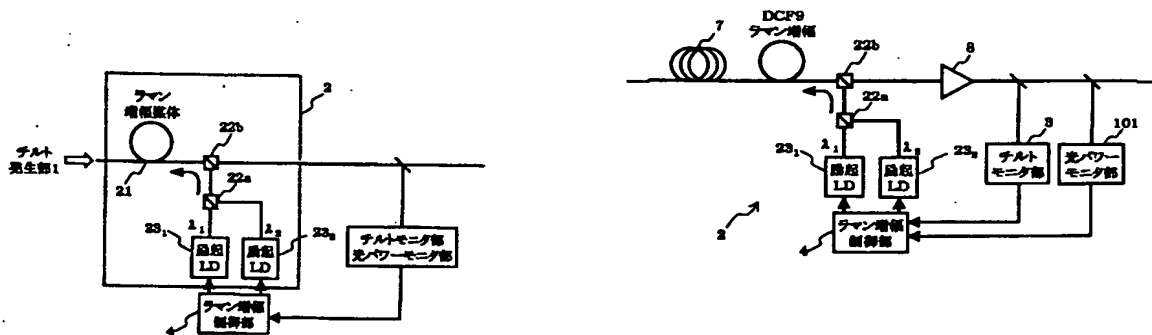


【図40】

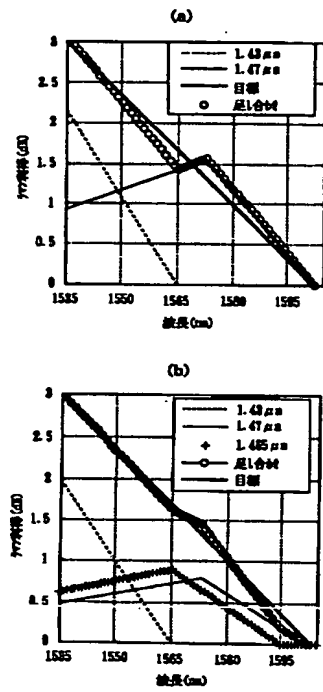


【図54】

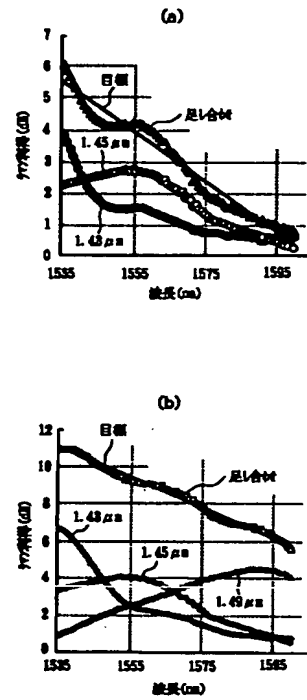
【図44】



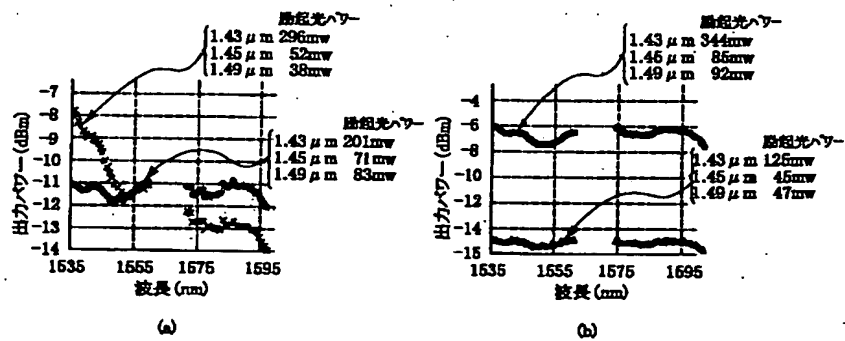
【図4 1】



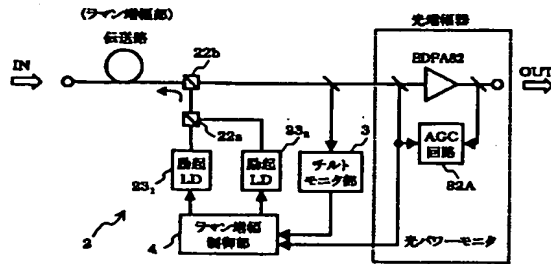
【図4 2】



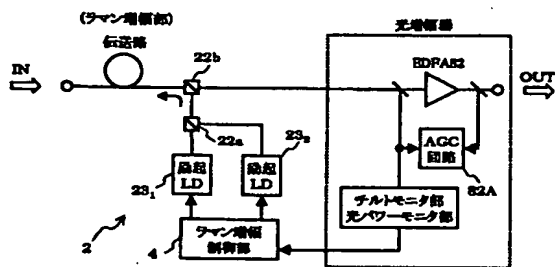
【図4 5】



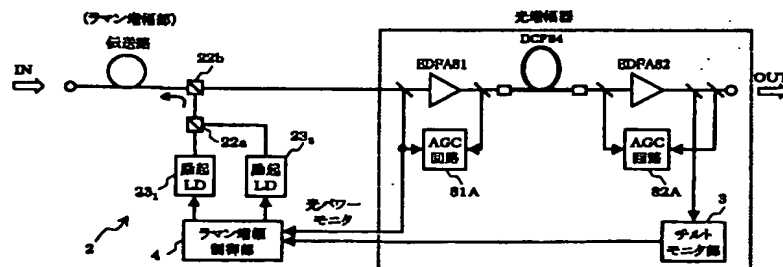
【図4 6】



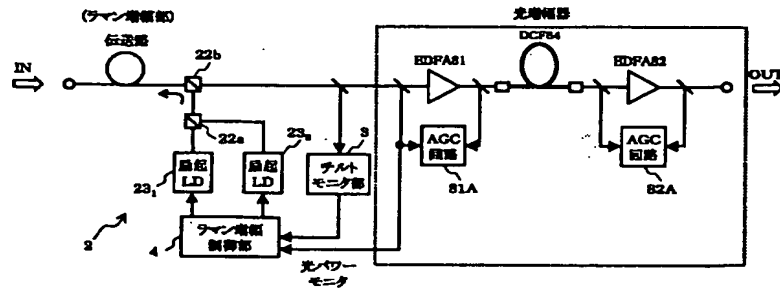
【図4 8】



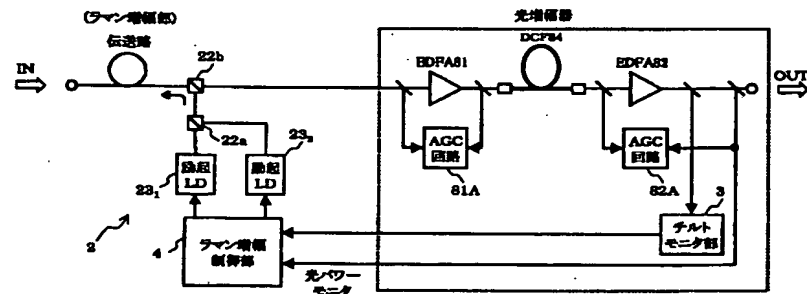
【図4 9】



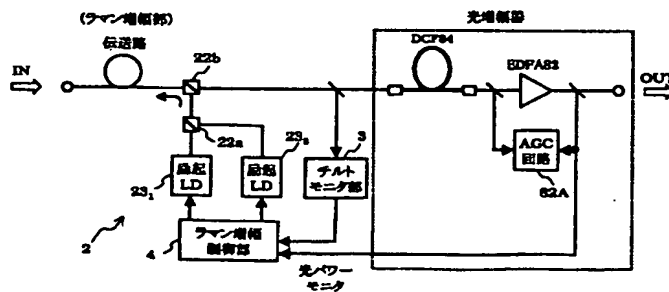
【図50】



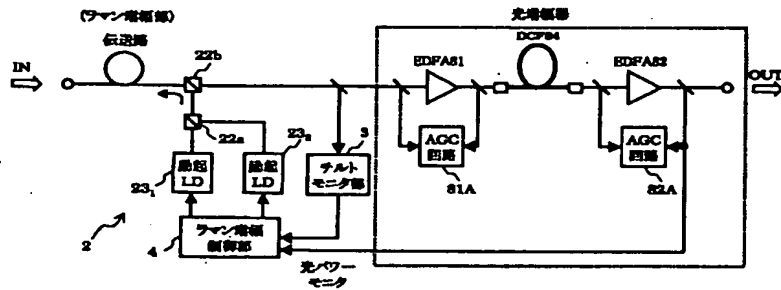
【図51】



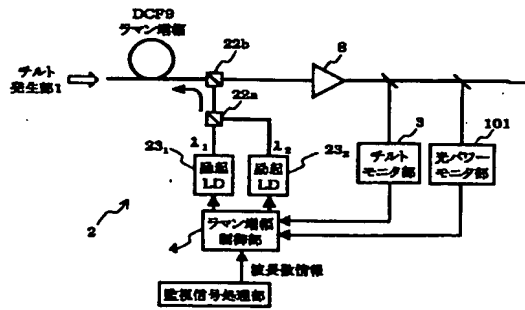
【図53】



【図52】



【図55】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.<sup>7</sup>

H04J 14/00

14/02

識別記号

F I

メモコード (参考)